

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE
DE FRANCE

CETTE SOCIÉTÉ, FONDÉE LE 17 MARS 1830,
A ÉTÉ AUTORISÉE ET RECONNUE COMME ÉTABLISSEMENT D'UTILITÉ PUBLIQUE
PAR ORDONNANCE DU 3 AVRIL 1832.

CINQUIÈME SÉRIE

TOME ONZIÈME

FASCICULE 7-8-9

Feuilles 16-25 — Planches VI et VII

41 figures dans le texte

PARIS
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
28, rue Serpente, VI

COMPT. DE CHÈQUES POSTAUX PARIS, N^o 173-72
Téléph. : DANTON 90-61

1941

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

FONDÉE LE 17 MARS 1830.

Etablissement d'Utilité Publique, reconnu par Ordonnance du 3 avril 1832.

EXTRAITS DU RÈGLEMENT

ART. 2. — L'objet de la Société est de concourir à l'avancement de la Géologie en général et particulièrement de faire connaître le sol de la France, tant en lui-même que dans ses rapports avec les Arts industriels et l'Agriculture.

ART. 3. — Le nombre des membres de la Société est illimité. Les Français et les Étrangers peuvent également en faire partie. Il n'existe aucune distinction entre les membres.

ART. 42. — Pour assister aux séances, les personnes étrangères à la Société doivent être présentées chaque fois par un de ses membres.

ART. 46. — Aucune communication ou discussion ne peut avoir lieu sur des objets étrangers à la Géologie ou aux Sciences qui s'y rattachent.

ART. 48. — Chaque année, de juillet à novembre, la Société tiendra une ou plusieurs séances extraordinaires sur un point qui aura été préalablement déterminé.

ART. 55. — Tous les travaux destinés à l'impression doivent être inédits et avoir été présentés à une séance.

ART. 75. — Les auteurs reçoivent 50 tirages à part de leurs communications insérées au *Bulletin* : ils peuvent en outre en faire faire à leurs frais, en passant par l'intermédiaire du Secrétariat.

AVANTAGES ACCORDÉS AUX MEMBRES

Les membres de la Société reçoivent *gratuitement* les **Comptes rendus des séances et le Bulletin**.

Le service de la **Bibliographie des Sciences géologiques** n'est fait qu'aux membres qui envoient 50 fr. par an pour les frais de port et de manutention.

Les membres peuvent utiliser le prêt des livres à *domicile* (cautionnement 300 fr.).

Ils peuvent *acheter* à la Société : 1° avec une remise de 50 %, les **Comptes rendus et les Bulletins** (260 fr. l'année), la **Bibliographie** (100 fr. l'année), les **Mémoires de Géologie** (par mémoire); 2° avec une rem. de 20 %, les **Mémoires de Paléontologie** (par mémoires séparés), les **Mémoires** (nouvelle série) par souscription au volume (220 fr., étr. 250) ou par mémoires séparés.

La Société met également en vente les ouvrages de Fontannes et de Cossmann. Catalogue et prix sur demande.

1. La remise ne s'applique que pour un seul exemplaire. Elle ne s'applique pas aux séries complètes, mises en réserve, qui ne sont vendues qu'après décision spéciale du Conseil.

CONDITIONS D'ADMISSION

Être présenté à une séance de la Société par deux de ses membres qui auront signé la présentation et avoir été proclamé dans la séance suivante (art. 4 du Règlement).

A défaut de deux parrains, adresser au Secrétariat un exposé de titres et références.

Cotisation : 100 francs par an.

Membres à vie : 3.000 francs.

Membres à perpétuité : 5.000 fr.

Pour tous renseignements, achats et abonnements, s'adresser impersonnellement au Secrétaire de la Société, 28, rue Serpente, Paris, VI*.

LA VIRGATION SUD-RIFAINE
RECHERCHES SUR LA MARGE SUD DU SILLON RIFAIN
(SECTEUR HAUT-OUERGHA-HAUT-LEBEN)

PAR **Jean Lacoste** ¹⁻².

A la suite de la description de la virgation sud-rifaine, donnée dans une étude antérieure, j'ai déjà eu l'occasion d'ajouter certaines observations portant soit sur le style d'ensemble (1, 2, 3), soit sur le dispositif de ses éléments les plus marginaux (4).

Au cours du présent exposé, je me propose de considérer en un bref aperçu la virgation sud-rifaine en tenant compte des résultats ci-dessus mentionnés et de ceux acquis, ces dernières années, dans la partie moyenne de cette chaîne (Haut-Ouergha-Haut-Leben) en liaison avec M. J. Marçais. D'autre part, les résultats obtenus dans la partie marginale du Prérif, par levés de surface ou par sondages profonds, et que les géologues du Bureau Minier et moi-même avons en partie annoncés en différents exposés, feront l'objet d'une prochaine étude.

Enfin, les caractères de cette région sud-rifaine doivent nécessairement être envisagés à la lumière des connaissances réunies par M. P. Fallot sur le Rif septentrional (5), et d'autant plus précieuses pour les géologues sud-rifains que la dorsale calcaire et les masses paléozoïques du littoral rifain de la Méditerranée constituent l'élément essentiel de la chaîne et en commandent en partie la structure.

Afin de faciliter cet exposé, on nous permettra de rappeler les éléments structuraux principaux de la chaîne rifaine :

Au Nord, le croissant de terrains paléozoïques bordant la Méditerranée ; — puis la chaîne calcaire où, d'après M. Fallot (5, p. 285) « la série secondaire et tertiaire autochtone est recouverte par des masses charriées bousculées au front d'un compartiment de paléozoïque qui s'est déplacé vers le SW » ;

puis la zone subsidente marno-schisteuse du sillon rifain à sédiments secondaires et surtout crétacés, s'étalant vers le Sud sur une largeur de 40 à 50 km. ;

1. Note présentée à la séance du 9 juin 1941.

2. Intervention de M. Bourcart ; félicitations des géologues marocains.

14 décembre 1942.

Bull. Soc. Géol. Fr. (5), XI. — 16

puis le bord sud de ce sillon rifain caractérisé par les reliefs calcaires du Rif méridional ;

puis le sillon prériefain dont les sédiments secondaires et tertiaires sont refoulés au Sud et refluent sur l'avant-pays, c'est-à-dire soit sur la plaine atlantique du Rharb, dans le secteur étudié par M. Bourcart (6), soit sur les rides prériefaines que décrit M. Daguin (7), soit, plus à l'Est, sur le Causse du Moyen-Atlas (ce contact de bordure ayant été observé par MM. Savornin, Daguin, vers Touahar, puis par M. Marçais).

De la Méditerranée à la marge externe du Prérief, tout cet ensemble est, on le sait, poussé au Sud, chaque unité pressant ou chevauchant l'unité plus externe qui lui fait suite.

Les éléments constitutifs de la virgation sud-rifaine que nous aurons plus spécialement à considérer ici sont :

le bord sud du sillon rifain avec ses reliefs calcaires formant les branches internes et la partie nord du sillon prériefain.

Précisons, en outre, que cet aperçu concerne la partie ouest et centrale de cette virgation, la partie orientale devant être décrite dans le mémoire qu'y consacrera M. Marçais.

MARGE SUD DU SILLON RIFAIN :

STRUCTURE DE LA RÉGION HAUT-OUERGHA-HAUT-LEBEN.

La région comprise entre le Haut-Ouergha et Haut-Leben se situe dans la partie centrale de la virgation, à la marge S de la série schisteuse du sillon rifain, à une distance d'environ 80 km. au NE de Fès, 50 km. au N de Taza, et à une quarantaine de kilomètres au droit et en arrière du contact marginal du Prérief sur le Moyen-Atlas.

Cette région a fait, à diverses reprises, l'objet d'observations communes de la part de M. Marçais et de moi-même ; tout d'abord en 1931, alors qu'étudiant depuis Ouezzan le Rif méridional, j'atteignais, en bordure E de ma carte, ce secteur Ouergha-Leben, nous l'avons examiné ensemble. A ce moment, les levés de M. Marçais s'effectuaient au N de Taza, donc très distants vers l'Est ; étant moi-même appelé par les recherches pétrolifères qui s'amorçaient dans le Prérief, nous avions remis les travaux de raccords entre le secteur considéré ici et la région située à l'Est et étudiée par M. Marçais. Nous les reprîmes en octobre 1937, en compagnie de M. Daguin, aux abords de Taï-neste, où M. Marçais venait d'observer la présence de recou-



SCHEMA DES RECOUVREMENTS DU MASSIF DES SENHADJAS,
D'APRES DES LEVERS FAITS EN COMMUN PAR J. LACOSTE ET J. MARÇAIS
Abréviations : D. D. Djebel Drinkel ; D. M. Djebel Mhamba ; T. Teirara ;
K. Crête de Koriine ; O. Br. Ouled Brahim ; B. A. Bou Adel.

vrements¹ ; en mars 1938, puis en mai 1938, cette dernière campagne étant effectuée avec M. Fallot. A la suite de ces observations, un exposé, destiné à compléter une note préliminaire commune (8), devait être fait par M. Marçais et moi. Les circonstances n'ont pas, depuis, permis de réaliser ce projet et risquent de le retarder encore. Aussi, afin que ces faits puissent être consignés, et selon l'accord de M. Fallot, je crois devoir en entreprendre l'exposé, étant bien entendu que le nom de M. Marçais est étroitement associé aux observations rapportées dans cette note. Et notre confrère aura, nous l'espérons, prochainement l'occasion d'apporter toutes précisions qu'il jugera désirables sur ces régions touchant au Rif oriental, dans la thèse qu'il tient en préparation.

Ces observations tectoniques sont établies sur la base des données stratigraphiques et paléogéographiques que j'ai antérieurement énoncées et sur lesquelles on ne reviendra pas ici, sauf pour résumer la succession des terrains en jeu : d'abord sur du primaire métamorphique qui apparaît sporadiquement en quelques dispositifs tectoniques, le Trias habituel à ces régions : marnes rouges, gypse, etc... ; puis les calcaires rapportés globalement au Lias et en partie au Jurassique, et formant les gros reliefs ; puis les marnes schisteuses représentant une série compréhensive secondaire mais surtout d'âge crétacé, et surmontées par un flysch calcaire correspondant à l'Éocène supérieur et, en certains points (et d'une façon probablement plus générale), à l'Oligocène, voire au Burdigalien. Enfin, les grès, conglomérats et marnes du Vindobonien localisés au N et au S du secteur étudié, dans les synclinaux serrés et plus ou moins écrasés du Haut-Quergha et du Téhéris.

Au point de vue structural, ces observations tiennent compte d'un fait nouveau que M. Rey et moi avons signalé et décrit, d'abord pour le Prérif (9), et que M. Marçais (10) a observé dans sa région d'étude (Taïnest, oued Asfalou) dans l'Est du secteur ici étudié : à savoir l'existence d'une phase orogénique, d'âge helvétien (post-burgalienne et anté-tortonienne), précédant la phase post-vindobonienne à laquelle, comme M. Daguin et moi l'avons noté, on rapportait généralement dans ces régions les dislocations d'âge miocène. La position structurale des divers reliefs calcaires situés à la limite du sillon rifain, dans la masse schisteuse duquel ils sont inclus, et du sillon pré-rifain, est donc à considérer en fonction de ces deux phases orogéniques.

1. Décrits successivement par notre confrère en 1937 (12) et en 1938 (10).

Et à cet effet doivent être particulièrement retenus certains caractères de ces massifs calcaires.

La question de la position structurale des reliefs calcaires en bordure de la zone schisteuse.

Ces reliefs sont ceux pour lesquels, pour des raisons principalement d'ordre sédimentaire et paléogéographique (11) et pour souligner surtout leur analogie de relief en bordure de sillon avec les rides pré-rifaines, j'ai proposé le nom de « rides rifaines méridionales ».

Si, en effet, ainsi que j'ai cru devoir l'admettre, on reconnaît, au Sud du sillon subsident rifain, la présence d'un sillon pré-rifain à matériel sédimentaire notablement différent, on envisage ainsi implicitement qu'un relief préliminaire intermédiaire a permis cette différenciation. Car il semble qu'il n'y ait pas progressive transition d'une série profonde à une série épicontinentale ; leurs caractères sont beaucoup plus tranchés, et je n'en veux que rappeler ici brièvement comme preuves : l'apparition à l'extrême bord N du Prérif d'un Crétacé inférieur marno-calcaire très fossilifère, à peu près inconnu dans la série schisteuse ; la disparition des marnes blanches éocènes dès qu'on atteint cette même série (cette disparition n'étant pas due seulement aux mouvements tangentiels puisque ces marnes sont, en certains points, transgressives sur la série schisteuse). D'autre part, à ce bord N du Prérif, l'Éocène est directement transgressif sur le Crétacé inférieur et moyen, le Crétacé supérieur à Foraminifères étant absent, alors que, dans les zones plus méridionales du Prérif, il forme une série épaisse d'au moins 1.000 mètres.

Ces faits suggèrent qu'entre les deux sillons un seuil sédimentaire a fonctionné durant le Secondaire et le Tertiaire. Or, il semble qu'on soit autorisé à faire un rapprochement entre la présence de ce seuil et la présence, aux confins des deux sillons, et groupées visiblement sur ces confins, sur une profondeur ne dépassant pas 30 à 40 km. et généralement beaucoup plus réduite, depuis Ouezzane jusqu'aux extrémités orientales du Rif, de masses calcaires dont, tant au Lias qu'au Crétacé, s'observent les caractères néritiques ou peu profonds des dépôts qui y sont liés (11, p. 449). Ces faits appuient la notion des rides rifaines méridionales.

De même, M. Marçais ne paraît pas très éloigné de cette opinion, quand il note que, à la limite de la zone schisteuse et du bord N du sillon-prérifain, « des débris d'un calcaire très néri-

tique du Jurassique supérieur jalonnent ce contact depuis Béné-Ftah jusqu'à Tizeroutine et plus loin au NE ; ce sont peut-être les restes brisés d'une cordillère qui aurait à cette époque séparé les sillons » (12).

Le destin tectonique de ces reliefs préliminaires a pu évidemment être quelque peu différent suivant qu'ils occupèrent une position plus ou moins interne dans la virgation, ou suivant leur situation au centre ou aux ailes de l'arc rifain.

Mais, de toutes façons, ce terme de rides rifaines méridionales ne saurait exclure — je l'ai précisé (11, p. 548) — l'idée des importantes pressions tangentielles subies par ces massifs et qui les ont rendus plus ou moins *décollés et chevauchants* (*id.*, p. 552), affectés de ruptures par cisaillement, par éclatement d'aires anticlinales primitivement homogènes, et par des étirements considérables des couches de ces masses calcaires (*id.*, p. 530, 538, 548), celles-ci se comportant alors comme des noyaux résistants et indépendants (*id.*, p. 628, 647) au sein des couches marno-schisteuses qui les enveloppent. En désignant comme *lippes* bon nombre de ces reliefs (*id.*, p. 410), il m'a paru nécessaire de les considérer, sinon comme des lambeaux de recouvrement, du moins comme des *lambeaux déracinés, arrachés*, venant de la profondeur et flottant dans la masse des terrains marneux ou marno-schisteux comprimés. Ils sont ainsi, dans l'Ouest, beaucoup plus significatifs, en somme, d'un style extrusif que témoins de charriages plats, — différences de dispositifs qu'il est souvent bien délicat d'apprécier devant ces noyaux, privés, longitudinalement et en profondeur, de toute continuité.

Les esquisses des massifs Messaoud, Amergou, par exemple, et aussi des lames des Sofs (*id.*, p. 520, 529, 542) montrent bien les aspects d'un tel style, fréquent dans toutes ces régions sud-rifaines.

En outre, les actions de serrage et de déplacements tangentiels sont visiblement plus accusées vers l'Est et, antérieurement, je les avais observées surtout dans ce secteur Haut-Ouergha-Leben, et particulièrement dans *le massif des Senhadjas*. Le caractère anormal de tout son bord S (avec Trias et granite) observable sur un front de 14 km., avec débordement de 2 km. sur la série schisteuse, me suggérait le passage de l'Ouest vers l'Est de séries considérées comme en place à *des séries décollées qui présentent tous les caractères de nappes*, et qui, étudiées isolément, pourraient être interprétées comme telles (*id.*, p. 502).

L'examen que nous fîmes de ce massif, en 1938, M. Fallot, M. Marçais et moi, examen portant plus spécialement sur les

ailes et sur le flanc N, a développé la notion du décollement du massif et défini son caractère de nappe. La présence d'une série vindobonienne reposant sur le flanc N était jusqu'ici l'argument s'opposant à l'idée d'un lambeau de recouvrement de mise en place post-vindobonienne. Ceci m'avait conduit à proposer une interprétation par failles multiples accompagnant les lames calcaires du flanc N manifestement brouillé et disloqué, ces accidents pouvant s'expliquer par les efforts imposés à cette partie du massif pour s'accorder à l'avancée de la partie frontale. C'est ce qu'a tenté d'exprimer la carte provisoire de la région rifaine méridionale (13), à laquelle le lecteur pourra se reporter pour suivre cet exposé.

Les observations faites en compagnie de M. Fallot et de M. Marçais sur l'aile orientale du massif, nous ont permis de retrouver sous la masse calcaire représentant le Lias-Jurassique et sous la série schisteuse d'âge secondaire qui l'enveloppe, la présence du flysch nummulitique, prolongement de celui qui s'étend sur la vallée du Haut-Ouergha, et dont j'avais noté les affleurements jusqu'aux abords orientaux des Senhadjas. Ces observations sur le soubassement nummulitique ont été faites au col de Sidi Soussane, situé au revers E du Dj. Drinkel. Dans le ravin de l'oued descendant de ce col vers l'Ouergha, des calcaires paléozoïques ont été remarqués sous la série schisteuse, ces calcaires se plaçant ainsi probablement au contact de celle-ci et du flysch nummulitique sous-jacent.

D'autre part, sur le flanc N, au-dessus de Bou Adel, une frange d'affleurements de roches éruptives paraît s'insérer au contact des calcaires et de la série schisteuse. Enfin, sur le sentier qui descend de Zarta vers l'Ouergha se placent, à la base des calcaires, des bancs de flysch que vraisemblablement on doit être autorisé à attribuer au Nummulitique, réapparaissant ainsi en substratum du massif.

Plus à l'Est, le *Dj. Teirara* montre — je l'ai déjà décrit — le contact anormal de son flanc S sur le flysch nummulitique de Kef el Char, avec là encore, interposition d'une lame de granite.

Lorsqu'en mars 1938, nous avons, M. Marçais et moi, traversé le *Teirara* sur le trajet E-W du col de Amasseur, nous avons retrouvé sur le revers W des affleurements de granite enrobés dans la série schisteuse, au-dessus de Zitouna. En ce qui concerne la terminaison N, l'observation qu'on en peut faire depuis les hauteurs situées immédiatement en arrière, paraît indiquer le relèvement du flysch nummulitique sur le massif. Mais ainsi que nous en avons discuté, M. Marçais et moi (8), il

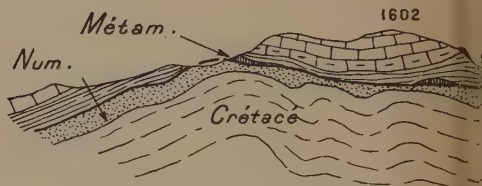
MASSIF DU DJ. KEIL

1629



DJ. DRINKEL

1602

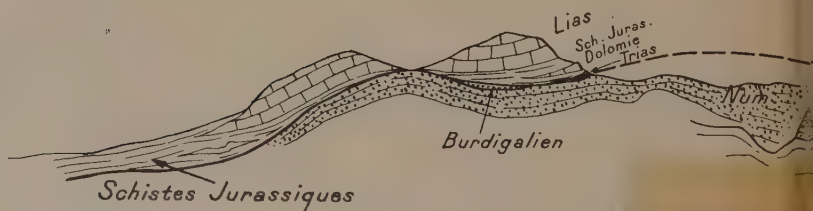


ARETE O. DU TEIRARA

O. TAMDA



DJ. TEIRARA



2000 m.

1000 m.

0

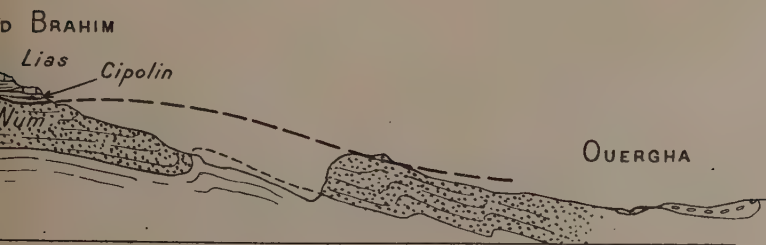
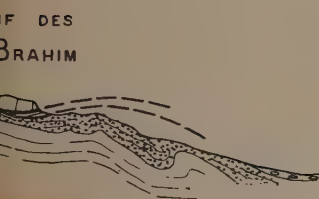
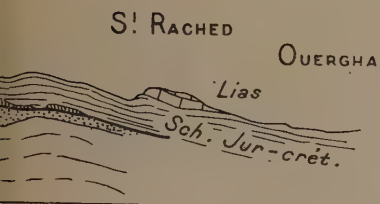
1

2

3 kms.

Schistes

COUPES EN SÉRIE A TRA
Les coupes sont parallèles entre



EIF DES SENHADJAS
à gauche, le NW à droite.

s'agirait de toutes façons d'une zone bien étroite pour y voir l'enfoncement vers le N du massif en dispositif normal. D'autre part, les contacts du revers NE indiquent, d'après les observations de MM. Fallot et Marçais faites en 1937, la subordination du flysch nummulitique aux calcaires du Teirara.

Quatre kilomètres au NE, le relief *Ouled-Brahim*, constitué là encore par les calcaires liasiques et la série schisteuse, pose le problème du dispositif normal ou non du flanc N. Contre celui-ci semblent s'appliquer le flysch nummulitique et les grès miocènes qui plongent au N vers l'Ouergha. Toutefois, on a pu observer que le flysch s'insinue entre les divers klipptes constituant les reliefs calcaires. Nous nous sommes demandé si un style extrusif pouvait expliquer les rapports de ces calcaires et du flysch, mais les rentrants de celui-ci sur la transversale N-S que nous avons suivie et les lames de cipolins à la base des calcaires sont des témoignages en faveur de la superposition de ceux-ci au flysch nummulitique.

*La lame de série schisteuse associée aux lambeaux
de poussée calcaires.*

La série schisteuse qui accompagne chacune de ces masses calcaires s'étend largement entre elles, occupant particulièrement la zone qui s'étend entre les Senhadjas et le Teirara et, au Sud, pousse ses avancées jusque non loin de la ligne des Sofs. La superposition de cette série schisteuse au flysch nummulitique s'observe, comme nous venons de le voir, d'une part dans les trois reliefs ci-dessus mentionnés et, d'autre part, dans le *dispositif en fenêtre de la vallée de l'oued Tamda*. Cet oued, dont le cours supérieur, entre Ouled-Brahim et Senhadjas, se trouve parallèle à celui de l'Ouergha, a entaillé profondément la série du flysch nummulitique sous lequel apparaissent, en aval de Tamda, des affleurements marneux qu'il convient d'attribuer à du Crétacé, en position autochtone, mais qui peut avoir, lui aussi, participé à un déplacement d'ensemble. L'examen que nous avons fait, en 1931, M. Marçais et moi, du cours inférieur du Tamda, à partir de Beni-Oulid, ne nous avait pas montré les rapports de la série schisteuse et du flysch, rapports qui apparaissent nettement si l'on suit, comme nous l'avons fait en 1938, l'arête de l'entablement de flysch qui, au N de Tamda, s'incline régulièrement vers l'Ouergha.

Sur cet entablement, à l'Est de Beni-Oulid, la présence d'une petite klippe calcaire que j'ai figurée à 1 km. environ au S de

l'Ouergha, pouvait paraître le témoin d'une bavure locale, sur le flysch, de la série schisteuse, — d'où pointent d'ailleurs tout près de là les klippes plus notables de Si Rached. Mais, d'autres lambeaux calcaires et de série schisteuse constituant la crête Koriine reposent sur l'entablement incliné de flysch nummulitique. Plus à l'Est, entre Ouled-Brahim et l'Ouergha, un autre lambeau calcaire, reconnu par M. Marçais et moi, se place dans la même position anormale.

Sur le bord S de la fenêtre du Tamda, les rapports de la série schisteuse et du flysch sont à observer à la crête Mhamda, un peu à l'Est de Bab el Arbaa. Certains pendages au revers S de cette crête pouvaient être considérés comme l'indice du relèvement du flysch sur la série schisteuse. Mais si, comme je le pense aujourd'hui, à cette interprétation doit être préférée celle du prolongement de ce revers S du Mhamda sous la série schisteuse (le flysch réapparaît en petite fenêtre à 2 km. au S de Mhamda) cela entraîne le recouvrement par une lame, ou une répétition de plusieurs lames-écailles de série schisteuse, de toute la zone comprise au S entre le Mhamda et l'Oued Leben et peut-être au delà, en direction des Sofs, c'est-à-dire sur une profondeur d'une quinzaine de kilomètres.

Ampleur des avancées de la série schisteuse.

Les faits observés, dont est rapporté ci-dessus l'essentiel, sont significatifs de la présence, à la marge sud du sillon rifain et dans le secteur compris entre le Haut-Ouergha et le Haut-Leben, et probablement jusqu'aux Sofs, d'une série déplacée du N vers le S, issue du bord du sillon rifain, et composée du matériel schisteux provenant de celui-ci. Cette série schisteuse enrobe des lambeaux de poussée calcaires accompagnés de lames de Trias et de roches du socle (granite). Cette série repose en recouvrement sur le flysch nummulitique qui joue, par rapport aux éléments déplacés, le rôle d'autochtone (compte tenu, comme nous le verrons, du déplacement relatif d'ensemble qui a pu affecter toutes les séries sédimentaires sud-rifaines).

Quelle est la valeur du déplacement horizontal subi par cette série schisteuse et par les éléments qui y sont associés? Sans vouloir faire intervenir ici les réductions de distance dues aux plissements successifs et en comptant les déplacements sur les dispositifs actuels, on constate que le recouvrement, de l'Ouergha aux Sofs de Bab Taza, s'étend, sur la transversale de l'aile orientale des Senhadjas, sur une distance de 20 à 25 km. C'est

encore la même distance d'une vingtaine de km. que l'on reconnaît entre l'Ouergha et le revers sud du Teirara, au delà duquel les travaux de M. Marçais nous éclaireront sur la continuation ou non vers le S de la lame schisteuse.

Quant aux racines de cette série charriée, on n'en peut nullement inférer la situation, car la masse plastique du sillon progressivement refoulée au Sud a évidemment effacé toute cicatrice observable. Il s'agit d'ailleurs beaucoup plus d'un *style de translation par refoulement, par glissement, plutôt que par surplissement*.

Toutefois, il ne semble pas qu'il y ait actuellement de raisons valables pour situer la zone de départ de la série Senhadjas-Teirara-Brahim, au delà, vers le N, du massif nummulitique de Karia qui se place au N de l'Ouergha et est manifestement en repos normal sur la série schisteuse. Sur ce massif de flysch ne se trouve d'ailleurs aucun lambeau de Lias. Ce serait donc dans la masse schisteuse subordonnée à ce flysch qu'on pourrait voir l'origine de la lame charriée Senhadjas-Teirara-Brahim (les pointements du Lias au sein des schistes, sur la rive droite de l'Ouergha, peuvent intervenir en faveur de cette manière de voir).

L'hypothèse qui consisterait à faire participer les massifs de Lias de Tifelouast et Bou Slama, situés au N de l'Ouergha, au même recouvrement que celui des Senhadjas, devrait s'appuyer sur la présence de témoins charriés qui se situeraient entre ces massifs et les Senhadjas, sur le flysch de Karia. De ces massifs Tifelouast et Bou Slama, je ne connais pas le revers N qui est en zone espagnole, mais ils apparaissent profondément enserrés dans la série schisteuse et le caractère anormal (11, p. 497) des contacts de leur revers S — où apparaît du Trias — avec la série schisteuse, peut aussi bien témoigner d'un style de percement en écaille de ces masses calcaires, plus ou moins décollées, et incluses dans la série schisteuse refluant elle-même vers le Sud.

D'ailleurs, sur le même alignement, se place, plus à l'Est, le Dj. Azrou Akchar, constitué aussi par les calcaires du Lias, et il ne semble pas, d'après les observations publiées par M. Marçais sur ce relief (12, 14), et d'après nos conversations plus récentes à ce sujet, que notre confrère le conçoive autrement que comme saillant, plus ou moins déversé, hors de la série schisteuse. Il faut donc, en ce qui concerne les reliefs liasiques de cette zone plus interne, se garder de généralisations rapides à partir du style de lambeau de poussée observé aux Senhadjas¹.

1. Dans le mémoire qui inaugurait la connaissance géologique du NE du Rif, M. et M^{me} P. Russo (15, p. 140, 145) ont mentionné la nappe des Senhadjas, de

Immédiatement à l'Est des Ouled Brahim et du Dj. Teirara, on sait, par les travaux de M. Marçais (10) que, sur le flysch nummulitique de la zone d'Ahel Imoula, traversée par l'oued Asfalou, s'étend en recouvrement, la série schisteuse accompagnée de lames de Lias ; — le front du recouvrement étant marqué par le relief liasique de Taïneste, dont la masse de granite située à sa base, et qu'à pu observer l'excursion de la Société Géologique de 1934, soulignait, même avant les interprétations actuelles, l'analogie de dispositifs avec ceux des Senhadjas et du Teirara. Dans ce secteur du Taïneste, l'avancée de la série schisteuse et des éléments associés fut d'abord appréciée par M. Marçais (12) à plus de dix kilomètres, appréciation qui sera sans doute majorée. Vers l'Est les travaux de notre confrère nous renseigneront sur l'extension de cette lame de recouvrement.

Vers l'Ouest, quel prolongement peut avoir le recouvrement des Senhadjas ? J'ai précédemment signalé que divers indices témoignent du refoulement de la série schisteuse vers le Prérif, en particulier dans le massif Rihane, Jaïas, Messaoud (13). La vallée de l'Ouergha près d'Ourtzagh montre, au revers S du massif Jaïas-Rihane, le Nummulitique chevauché par la série schisteuse. Il en est de même au revers S du Djebel Messaoud (11, p. 259).

Puisque, sur la même transversale, mais dans une zone un peu plus interne, le style du Djebel Aïn-Berda et des accidents qui le prolongent à l'Est, au delà de l'oued Amzez (et à la base desquels j'ai signalé des copeaux de schistes cristallins), suggère qu'il s'agit là de reliefs décollés, arrachés et accompagnés d'importantes masses de Trias, il apparaît que le secteur compris entre Aïn-Berda et Messaoud appartient probablement à la frange de refoulement de la série schisteuse sur le Prérif.

Cette frange vient refouler contre le massif nummulitique du Bibane qui est en quelque sorte le promontoire du pays pré-rifain vers le N, mais il est douteux, comme nous allons le voir, que cette frange ait recouvert et dépassé ce massif vers le SW. En d'autres termes, nulle raison ne paraît actuellement permettre de considérer la ligne la plus externe des reliefs rifains méridionaux jalonnée par les Djebels Arechko, Amergou, etc., comme des témoins d'une avancée de la zone schisteuse ayant

même que celle de l'Azrou Akchar, reposant sur un substratum non défini, et subordonnées, dans l'édifice des nappes rifaines, à la nappe supérieure formée par le flysch nummulitique venant des Boccoyas. Cette conception nous écarte donc des données ici exposées.

débordé les massifs oligocènes de Bibane et d'Issoual, ce qui impliquerait pour cette ligne de reliefs un déplacement minimum de 25 km. que ne prouve aucun lambeau sur l'Oligocène précité. Bien au contraire, l'aspect réglé des couches (11, p. 148, 216, 535) qui, du Toarcien au Crétacé inférieur inclus, se relèvent normalement, bien qu'avec des étirements, contre les noyaux calcaires domériens en question, incite plutôt à voir là des écaillés d'origine locale bien que poussées tangentiellement, et constituant l'avant de la zone schisteuse extérieurement au massif du Bibane. Ces écaillés chevauchent le Crétacé fossilifère marno-calcaire de la marge nord du Prérif, ainsi que son Nummulitique.

Pour ces raisons, il semble donc que ces noyaux et lames calcaires témoignent davantage de la présence d'un relief antérieur, pressé et fragmenté sous la poussée de l'ensemble de la série schisteuse, que d'une sorte de moraine tectonique, entraînée au front de cette série, depuis les zones plus internes du sillon rifain.

Le même faciès schisto-gréseux du bord de la série schisteuse se retrouve plus au NW, toujours au front de celle-ci, dans la forêt d'Izarène. Cette même formation est, là aussi, refoulée contre le Nummulitique du pays d'Ouezzane. Comme l'indique la carte de M. J. Bourcart (16) le contact anormal de l'Oued Zendoula est souligné par des blocs liasiques et paléozoïques. On constate pourtant ici que la virgation se desserre et annonce déjà les dispositifs plus libres qui vont diverger vers Ouezzane, en direction de l'Atlantique. En même temps, le Nummulitique, qui semble moins affecté par le refoulement de la série schisteuse, transgresse largement vers le N (flysch d'Issoual et de Zoumi) sur cette série; à 18 km. au N de Bibane, près de Beni-Ider, on trouve l'Éocène à sa place normale, reposant sur elle et sous le Miocène.

On observe ainsi que si, au front du refoulement, le Nummulitique est souvent chevauché par l'avancée de la série schisteuse, il existe aussi sur le dos de cette série, pouvant s'être déplacé avec elle; c'est le cas des restes de la couverture de marnes blanches éocènes des Jaïas, près de Rafsail, ou des massifs oligocènes de Zoumi, d'Issoual, de Bibane, et celui de Karia, au N des Senhadjas. De la même façon, les grands synclinaux nummulitiques, dans le Rharb de Souk-el-Arba, et du Prérif en général, sont entraînés par le mouvement des marnes crétacées qui les portent vers l'extérieur de la chaîne (4) comme des nefs prises dans la banquise et dérivant avec elle. Nous reviendrons, dans une autre étude, sur ce point.

Il semble donc, d'après l'examen du bord de la série schisteuse entre le méridien d'Issoual (à l'E d'Ouezzane) et celui des Senhadjas, que l'avancée tangentielle de cette série schisteuse contre et sur les sédiments pré-rifains s'accuse progressivement de l'W vers l'E.

En atteignant le secteur Senhadjas-Taïnesté, on se trouve à l'avancée maximum de la série schisteuse vers le S, c'est-à-dire sur l'axe de la virgation. On peut donc penser que le déplacement est plus prononcé ici en raison même de la position frontale de ce secteur, qu'à l'W, où le serrage paraît s'atténuer.

Dans cette région médiane de la virgation, chacun de ses éléments, comme on le prévoyait, pouvait tendre à devenir un front de nappe (11, p. 646).

On remarque, en outre, que c'est à l'arrière du secteur Senhadjas que s'étend la plus grande largeur de la série schisteuse qui atteint, sur cette transversale, la Méditerranée (entre les massifs calcaires de la dorsale et des Boccoyas).

Or, les effets mécaniques de cette extension de la série schisteuse sur l'axe même de la virgation ont été considérés déjà, par M. Fallot (5, p. 494), pour qui l'absence de masses calcaires septentrionales sur cet axe correspond à la propagation de tout l'effort à la zone subsidente. « Malgré sa plasticité, cette zone a transmis l'effort. Et cette direction selon laquelle plus d'énergie a été transmise à l'extérieur, coïncide avec le rayon de courbure Senhadjas-Mestasa. »

Compte tenu des mouvements préliminaires du Secondaire et du début du Tertiaire qui ont préparé le dispositif en virgation, la mise en place du dispositif charrié du secteur Senhadjas-Taïnesté a été réalisée au cours de deux phases, l'une post-oligocène ou post-burdigalienne et anté-tortonienne, l'autre post-vindobonienne. On est porté à attribuer à la première la part la plus effective dans la réalisation de ce recouvrement, où l'on voit l'Oligocène et probablement même le Burdigalien (10) servir de substratum. Cette phase, que l'on peut considérer d'âge helvétien, se montre donc contemporaine de la phase majeure des chevauchements pré-rifains (9).

Mais il serait insuffisant de considérer comme de simples rejeux les effets tectoniques réalisés par la phase post-vindobonienne, dont l'importance du serrage est révélée, en particulier, par les dispositifs en arc des grands synclinaux miocènes, qui ont tous tendance à partir progressivement en hauteur au NW, mais, au contraire, et précisément à partir de la transversale

des Senhadjas, sont souvent pris très profondément au SE dans les plissements et écrasés.

Il est possible qu'au cours de cette phase post-vindobonienne, qui a de nouveau plissé la région, les masses calcaires décollées mises en place par la phase précédente aient été, cette fois, peu déplacées (ainsi les Senhadjas semblent, en certains points de leur front S, ne pas déborder très largement sur le Vindobonien). Par contre, on voit la série schisteuse plus plastique et probablement plus facile à remettre en mouvement, réaliser de nouvelles avancées et écraser, par exemple (11, p. 491, 548), à peu près totalement le synclinal du Téhéris qui, pourtant, au droit de la partie occidentale des Senhadjas, s'étale encore sur près de 10 kilomètres.

De même, plus à l'Ouest, la poussée post-vindobonienne est des plus nettes sur la transversale Messaoud-Jaïas-A. Berda, alors que le secteur intermédiaire Taounate-A. Leuh ne témoigne que d'une très faible action tangentielle de la même phase. Ceci révèle, une fois de plus (11, p. 507, 530, 548), *l'inégalité, selon les transversales, des poussées exercées au front d'une même unité*¹.

En définitive, les faits ci-dessus exposés et discutés indiquent que le refoulement général de la série schisteuse subsidente rifaine de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne, refoulement visible sur toute la marge S de cette série, se manifeste dans le secteur Senhadjas-Taïnesté par une avancée plus prononcée qui paraît être de l'ordre de 20 à 25 km. Cette avancée se produit dans la partie centrale et à l'extrême front de la virgation. On peut donc penser qu'il s'agit là d'un *feston frontal* se prolongeant vers l'W avec, nous l'avons vu, une ampleur probablement réduite. Vers l'E, l'avancée se maintient et, peut-être même, s'exagère, bien que, jusqu'ici, les indices les plus nets de recouvrement signalés par M. Marçais paraissent être ceux décrits par notre confrère sur la transversale Taïnesté-Ahel-Imoula.

M. Marçais et moi avons pris soin de noter que, du fait de l'existence du recouvrement Senhadjas-Taïnesté « il ne s'agit pas de reprendre l'hypothèse de grandes nappes venues du N et composées d'éléments appartenant à une unité paléogéographique et structurale différente » (8).

D'autre part, étudiant les dispositifs de la dorsale, M. Fallot a mis en lumière cette conclusion (5, p. 292) que « en aucun

1. Rapprochons de ceci les exemples donnés par M. Fallot (5, p. 281, 493) « de la rapidité avec laquelle une écaille peut, dans cette chaîne, se développer ou mourir ».

cas, cette chaîne (la dorsale calcaire) ou les écailles qu'elle comporte localement, ne saurait constituer la racine de charriages de grand style ayant recouvert ou dépassé la zone du Flysch » (ou zone de la série schisteuse) (5, p. 14, 15).

Dans le mécanisme rifain, il convient donc de retenir maintenant que la série schisteuse, plus qu'on le pensait, a joué un rôle effectif de poussée, puisque celle-ci s'avère localement la plus accusée sur l'axe même de virgation, où la série schisteuse, seule, occupe les zones internes.

Dans une prochaine étude sera considérée la liaison de ces observations avec celles acquises sur la marge Sud du sillon pré-rifain.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. LACOSTE. Remarques sur quelques caractères structuraux et sur certains aspects de la géologie du pétrole dans deux régions à dispositifs analogues : subcarpathes et régions sud-rifaines. *CR. Ac. Sc.*, t. 203, p. 945, 9 nov. 1936.
2. J. LACOSTE. Esquisse géographique et tectonique des régions sud-rifaines et de leurs dispositifs en virgation, d'après les travaux de J. Bourcart, F. Daguin, P. Fallot, J. Lacoste, J. Marçais, du BRPM et de la SCP, 1/500.000^e. 2^e Congrès mondial du Pétrole, Paris, 1937. Tirage 3 teintes 60 cm. X 34. Serv. Topog. Chérif. Rabat, 1937.
3. J. LACOSTE. Sur la nature des dislocations profondes dans la partie centrale du Pré-rif. *CR. Ac. Sc.*, t. 205, p. 1081, 29 nov. 1937.
4. J. LACOSTE. Tectonique d'écoulement du Crétacé rifain. *CR. Ac. Sc.*, p. 257, 12 fév. 1940.
5. P. FALLOT. Essai sur la géologie du Rif septentrional, 548 p., 100 fig., 26 pl. hors texte. *Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*. Notes et Mémoires N° 40, Rabat, 1937.
6. J. BOURCART. Problèmes soulevés par l'étude stratigraphique du Rharb marocain. Centenaire Soc. Géol., Livre Jubilaire, p. 171-195. 1930.
7. F. DAGUIN. Contribution à l'étude géologique de la région pré-rifaine, 415 p., 57 fig. *Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*, Rabat. Thèse Sciences, Paris, 1927.
8. J. LACOSTE et J. MARÇAIS. Sur la nature et l'importance des chevauchements entre le Haut-Ouergha et le Haut Leben (Nord marocain). *C. R. somm. S. G. F.*, n° 7, p. 112-113, 1938.
9. J. LACOSTE et M. REY. Sur l'âge et la répartition de certains faciès du Miocène dans le Pré-rif. *B. S. G. F.*, 17 janv. 1938, 5^e S., t. VIII, pp. 305-320, 1 pl. photo, 1 carté, 2 tableaux.
10. J. MARÇAIS. Sur l'âge et le style des plissements dans la partie orientale de la chaîne du Rif. *C. R. somm. S. G. F.*, 1938, fasc. 17, déc., p. 330-331.

11. J. LACOSTE. Études géologiques dans le Rif méridional. 2 vol. *Serv. Mines et Carte Géol. Maroc. Notes et Mémoires*, n° 31, Rabat, et Thèse Science, Paris, 1934.
 12. J. MARÇAIS. Sur la constitution tectonique du Rif oriental français. *CR. Ac. Sc.*, t. 205, p. 1165-1167, 6 déc. 1937.
 13. J. LACOSTE. Carte géologique provisoire de la région rifaine méridionale 1/100.000^e. *Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*, n° 29, Rabat, 1934.
 14. MARÇAIS. Observations sur la région de Tizi-Ouzli (Rif oriental). *CR. Ac. Sc.*, t. 192, 1931, p. 757, une coupe au 1/100.000^e.
 15. P. Russo et M^{me} L. Russo. Recherches géologiques sur le NE du Rif. *Mém. Soc. Sc. Nat. Maroc*, 1929, 157 p., XVIII pl. photo., 1 carte.
 16. J. BOURCART. Carte géologique de reconnaissance des Djebala et du Rharb septentrional, 1/100.000^e *Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*, n° 21, Rabat, 1932.
-

ACTION DU VENT ET DU GEL AU QUATÉRNAIRE DANS LA RÉGION BORDELAISE

PAR **Alfred Bastin** ET **André Cailleux** ¹.

Planche VI.

L'action géologique du vent et du gel a été très intense, lors des avancées glaciaires quaternaires, sur les espaces dénudés situés au front de l'inlandsis nord-européen. Des études récentes (9) ont montré qu'elle s'est étendue à des régions que n'ont jamais atteintes les glaciers, mais où s'est fait sentir fortement la rigueur du climat glaciaire (massif armoricain, par exemple). Que devient-elle en des contrées encore plus méridionales, par exemple, dans le pays bordelais ? D'une part, on sait qu'une origine éolienne a été attribuée par plusieurs auteurs (1, 3, 4, 5, 12) au sable des Landes ainsi qu'à certains placages superficiels des environs de Bordeaux. D'autre part, des cailloux façonnés par le vent ont été signalés de Bussac (13). C'est essentiellement cette seconde manifestation que nous nous sommes proposé d'étudier. A-t-elle une valeur exclusivement locale ? Relève-t-elle de simples conditions littorales ? Ou au contraire paraît-elle liée, comme en Bretagne, à la dénudation consécutive aux refroidissements glaciaires ?

Les cailloux éoliens. — Les cailloux façonnés par le vent ne sont pas limités à la lande de Bussac. On en a récolté au Gurg, près Soulac (collections du musée de Libourne). Nous en avons découvert de nombreux gisements aux environs de Libourne (Pomerol, Lavaud, Goujon), de Royan (Saint-Palais, Bournet), et de Bordeaux (par ordre d'abondance décroissante : le Vigeant, Iltis, Courréjean, Le Haillan, Bouscau, l'Estage, Grassepan). Leur taille va de 2 à 10 cm., voire davantage ; leurs formes et aspects sont typiques : facettes lisses et luisantes, souvent un peu cupulées, séparées par des arêtes nettes, arquées ou sinuées (Pl. VI, fig. 5 à 9). Ils sont fait du même matériel (quartz, quartzite, silex) que les formations détritiques sous-jacentes. Nulle part, malgré de patientes recherches, nous n'en avons trouvé en profondeur dans les sédiments authentiquement en place : ils se rencontrent seulement à 0,5 ou 1 m. de profondeur au plus, par essaims nombreux mais pas toujours très

1. Note présentée à la séance du 3 novembre 1941.

étendus. En quelques localités, ils sont même très rares (Pichey, Martillac, La Grave d'Ambarès, Saint-Sulpice de Faleyrens).

Nulle part, sauf le long de la côte (Royan, le Gup), ils ne voisinent avec des dunes importantes. A Royan même on voit, sur la petite falaise qui termine vers le Nord la pointe de Saint-Palais, qu'ils ne sont situés ni dans la dune, ni même à la base de celle-ci, mais bien dans un limon ou head sous-jacent. Il y a donc lieu de distinguer ici au moins deux phases éoliennes nettement différentes; l'une, bien datée du Néolithique, se manifeste plutôt par des dunes et est limitée à la région littorale. L'autre ou les autres, plus anciennes, se manifestent plutôt par des cailloux éolisés et par des recouvrements uniformes de sable et s'étendent très loin du littoral actuel ou quaternaire vers l'intérieur des terres; leur genèse relève donc de conditions tout autres qu'il nous reste à examiner.

Sur le terrain, on voit que les cailloux éolisés sont emballés pêle-mêle avec d'autres galets, en général dans un sable graveleux, terreux ou dans un head, quelquefois dans un limon (les Eymerits près Libourne, Royan). Il est très rare qu'on les

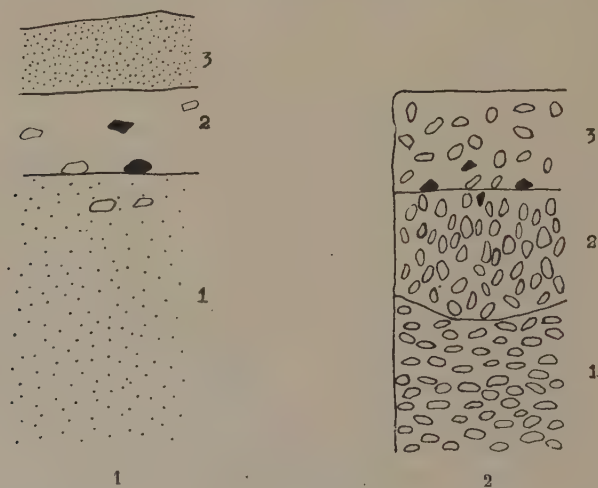


FIG. 1. — Falaise de Saint-Palais près Royan, extrémité NW, coupe schématique.

- | | |
|---|----------|
| 3. Dune récente. | 1 à 2 m. |
| 2. Limon avec quelques cailloux et galets.
Cailloux éolisés figurés en noir. | 0 à 1 m. |
| 1. Sable rouge (Éocène résiduel). | 1 à 3 m. |

FIG. 2. — Basse terrasse de la Garonne à Courréjean, coupe schématique.

- | | |
|---|----------|
| 3. Gravier terreux (terre végétale). | 0,4 m. |
| 2. Zone supérieure des alluvions, à galets dressés (cryoturbation). | 0 à 1 m. |
| 1. Alluvions en place, à galets posés à plat. | 1 à 3 m. |

Les cailloux façonnés par le vent sont figurés en noir.

rencontre dans la position même où ils ont dû être façonnés, formant un lit presque horizontal simplement recouvert de sable fin propre (Bussac pro parte) ou de gravier terreux, dans lequel certains d'entre eux sont d'ailleurs repris (Courréjean). En règle générale, au contraire, s'observent des signes de basculement ou de retournement postérieurs à l'éolisation : même pour des tailles excédant 5 cm., le pourcentage des cailloux façonnés sur toutes leurs faces est toujours élevé : 80 à 90 % au Vigean, 60 % à Bussac, 40 à 50 % à Pomerol ; les autres présentent leur face éolisée à peu près indifféremment dans toutes les orientations possibles : en-dessus, en-dessous, sur les côtés ; enfin les uns et les autres sont souvent couchés sur leur petit côté, ou dressés.

Ainsi la nature de la matrice, la répartition du façonnement et la disposition dans les gisements impliquent que, postérieurement à leur éolisation, les cailloux ont, pour la plupart, été soumis à des dérangements notables. Ceux-ci ne sont pas imputables au travail des vignes, car ils s'observent même sous bois. Faut-il y voir pour une large part, de même qu'en Bretagne, l'effet des imprégnations de neige ou de glace fondantes ou des alternatives de gel et de dégel, lors des périodes glaciaires ? Les faits suivants conduisent à le penser.

La cryoturbation. — Sur de nombreuses coupes on observe qu'en certains points, mais non partout, le sommet des formations détritiques, sur une épaisseur allant de 0,5 à 1 ou 2 m. contraste fortement avec la partie sous-jacente. Celle-ci présente les caractères habituels des formations déposées dans l'eau : galets en grande majorité posés à plat, « gisants » (7) ; surfaces de séparation des diverses couches à peu près horizontales. La partie supérieure, au contraire, porte par places la trace de dérangements importants :

1) Fentes en coin (Pl. VI, fig. 1 et 4), verticales ou presque, distantes de 5 à 25 m., profondes de 0,5 à 1,5 m., larges de 5 à 25 cm. en réalité (parfois davantage en apparence, du fait de l'obliquité des sections). Elles sont remplies soit de sable (Le Vigean, Bonnois, Léognan sud, Pichey), soit de galets dressés, soit de l'un et l'autre, les galets dressés tapissant dans ce cas les bords (Chambéry). Par tous leurs caractères, elles sont identiques aux fentes de rétraction liées au gel et connues à l'heure actuelle dans le nord de l'Alaska (17, 18) et au Quaternaire dans la bordure nord-européenne (11, 15, 16, 21, etc.) et en France (9).

2) Galets dressés abondants — 30 à 90 % — (Pl. VI, fig. 2 et 3), de même qu'à l'époque actuelle dans les régions dénudées et

froides du centre de l'Islande (9) et de la haute montagne norvégienne (Finse) et au Quaternaire en Bretagne (10). Exemples : Courréjean, Mignoy, Léognan sud, l'Estage, Pichey, Eysines sud. Les galets dressés sont emballés dans un gravier argileux, dans de l'argile graveleuse et sableuse (Le Vigean), plus rarement dans de l'argile (Chambéry). Ils peuvent ne se rencontrer que dans une petite partie de la carrière Courréjean, etc...).

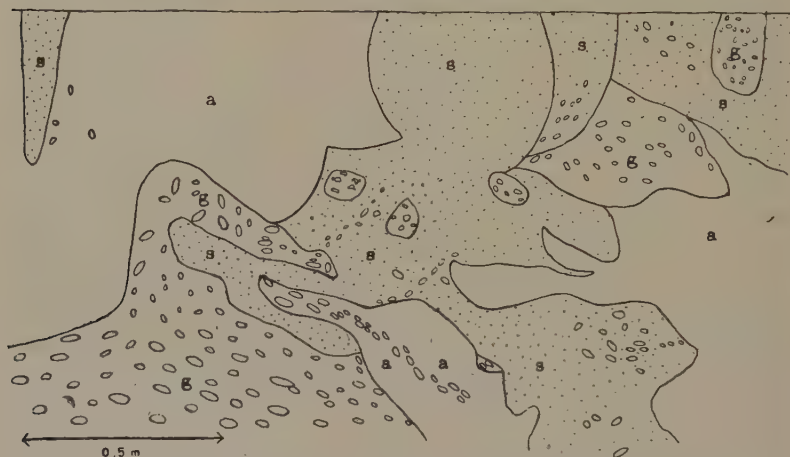


FIG. 3. — Dérangement intense des couches au sommet des alluvions anciennes de la Garonne à Chambéry (cryoturbation). Coupe verticale. a : argile. — s : sable. — g : gravier et galets.

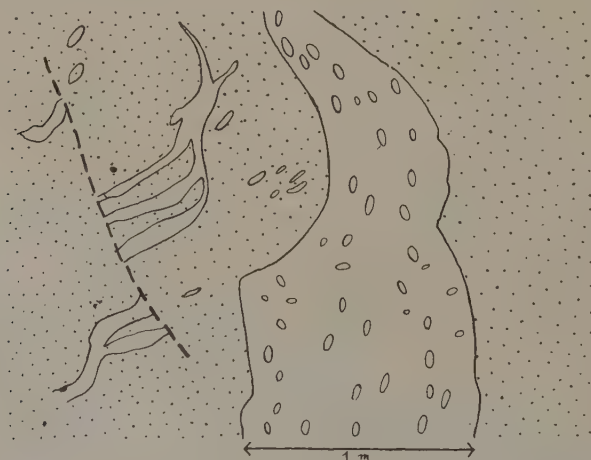


FIG. 4. — Dérangement intense des couches au sommet de graviers amygdalaires, à Cestas (cryoturbation). Coupe verticale. Notations : voir fig. 3. En trait interrompu : petite faille.

3) Contacts verticaux, ou fortement obliques, entre les divers types de sédiments : gravier, sable, argile, qui donnent parfois l'impression d'être disposés par paquets (fig. 3) et d'avoir été comprimés ou fragmentés (fig. 5) ; les galets sont alors, par places, fortement redressés.

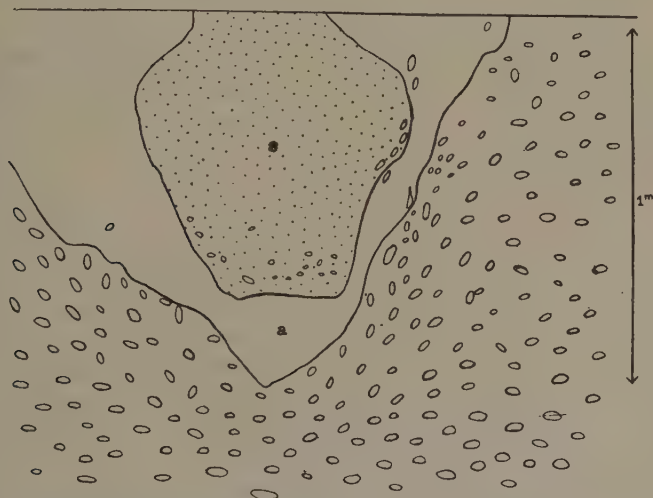


FIG. 5. — Poche d'argile (a) et de sable (s) au sommet des alluvions anciennes de la Garonne à Chambéry (cryoturbation). Coupe verticale.

Nous avons observé ce dernier aspect (3°) en des points où la pente du terrain atteint 5 à 10 % : Chambéry, Cestas, Eysines sud. L'écoulement des sols, ou solifluxion, a joué ici son rôle. Il n'en est pas nécessairement de même pour les autres effets (1° et 2°), qui peuvent se rencontrer même là où la pente est insensible. Mais les uns et les autres sont, ainsi que l'avait déjà remarqué Balland (renseignement verbal) inexplicables par le seul effet de la sédimentation fluviale et du ruissellement. Ils paraissent donc bien avoir été principalement conditionnés par le climat froid ; et de ce fait, c'est l'appellation de « cryoturbation » (11) qui leur convient le mieux.

Les rapports du façonnement éolien et de la cryoturbation. — Les marques de la cryoturbation et du façonnement éolien marchent de pair. Elles coexistent souvent dans les mêmes localités. L'une et l'autre sont très sporadiques : présentes dans une gravière, elles peuvent manquer dans une gravière immédiatement voisine. Elles sont à peu près de même âge : antérieures au Néolithique et à l'édification des dunes littorales (Royan... etc.) ;

évidemment postérieures aux terrasses au sommet desquelles on les observe : niveau de 40 m. (Le Vigean); niveau de 25 m. (Chambéry); et même basse terrasse de 5 m. (Courréjean).

Les cailloux éoliens étant surtout localisés au-dessus des galets dressés (fig. 3 et pl. VI, fig. 2), mais néanmoins eux-mêmes fortement dérangés, on voit que la cryoturbation s'est exercée en partie avant et en partie après l'action du vent. A Chambéry, des sables à grains éoliens et à cailloux à facettes sont affectés par la cryoturbation, tandis que d'autres du même type, mais plus récents, recouvrent par lambeaux les sédiments cryoturbés. Les deux phénomènes ont donc fréquemment alterné.

Un cas particulièrement suggestif à plusieurs points de vue est celui de certaines fentes en coin de Bonnois, Léognan et Pichey. Leur contenu, fait exclusivement de sable très pur, sans aucun gravillon ni granule, contraste avec la masse des formations détritiques encaissantes, presque entièrement graveleuses. Il ne s'agit pas d'une ségrégation; car les grains du remplissage sont complètement arrondis et mats, semblables à de petites graines, tandis que ceux de même taille (0,4 à 1 mm.) inclus dans le gravier encaissant, sont d'un tout autre type, presque exclusivement anguleux (90 à 100 %). Il y a donc eu apport. D'autre part, force est d'admettre qu'entre le début de l'ouverture et la fin du comblement, les parois de la fente sont restées cohérentes et solides, sinon quelques-uns des galets qui les tapissent, souvent en porte-à-faux, seraient tombés à l'intérieur et s'y seraient mêlés au sable, ce qui n'est pas. La même considération montre que, dans le cas envisagé, ni l'infiltration ni le ruissellement ni les écoulements boueux ne peuvent être tenus pour responsables du remplissage; reste, comme seul agent possible, le vent. Effectivement, contrastant avec l'angulosité des grains de sable du gravier encaissant, la forme ronde et l'aspect mat des grains du contenu attestent qu'ils ont été soumis à un façonnement éolien intense. Des placages superficiels de sable éolien existent précisément aux abords nord de Bordeaux (1,12): par la forme de leurs grains, ils s'avèrent identiques au contenu des fentes. Du fait qu'ils manquent, notamment aux abords sud de Bordeaux (19), nous n'avons pas le droit d'inférer à l'absence d'action éolienne: en surface du sol, le sable était balayé par le vent; il ne s'est conservé qu'à l'intérieur des fentes.

Nous sommes ainsi amenés à nous représenter le paysage bordelais, lors des périodes glaciaires quaternaires, comme un peu analogue à celui de l'Alaska septentrional ou de l'Islande centrale à l'époque actuelle. A la surface des vastes apports détritiques,

certaines aires se trouvaient, principalement du fait de la rigueur climatique, à peu près dépourvues de couvert végétal, soumises à un gel intense et balayées par de grands vents.

Le tableau ainsi esquissé n'est certes pas entièrement nouveau : flore (10 *ter*) et faune (6, 14) indiquent qu'à certaines époques du Quaternaire le climat de l'Aquitaine a dû être sévère. Cailloux éolisés et marques de cryoturbation conduisent, pour la région bordelaise à des conclusions du même ordre, en plus accentué peut-être. Moins rares que les documents paléontologiques, ils constituent un moyen auxiliaire commode pour les reconstitutions paléoclimatiques.

OUVRAGES CONSULTÉS

1. BALLAND René. Observations géologiques dans la vallée de la Jalle de de Saint-Médard. *Procès-verbaux Soc. Linn. Bordeaux*, 16 déc. 1936, p. 1-69, 5 fig.
2. BIGOT A. Bibliographie analytique des travaux sur les plages suspendues et les dépôts de solifluxion dans le Massif armoricain et les îles anglo-normandes. *Revue Géogr. phys. et Géol. dyn.*, IX, 2, p. 193-208, Paris, 1936.
3. BLAYAC J. Relations des Sables des Landes avec les terrasses de la Garonne. *CR. Ac. Sc.*, 157, 1483-1485, Paris, 1913.
4. BLAYAC J. Contribution à l'étude du Quaternaire des Landes et de la Gironde. *Bull. Serv. Carte Géol. Fr.*, XXIII, 136, p. 136-140, Paris, 1913-1914.
5. BLAYAC J. Contribution à l'étude du sol des Landes de Gascogne, *Ann. de Géogr.*, XXV, p. 23-46, Paris, 1916.
6. BOULE Marcellin et G. CHAUVET. Sur l'existence d'une faune d'animaux arctiques dans la Charente à l'époque quaternaire. *L'Anthropologie*, X, p. 315-317, Paris, 1899.
7. CAILLEUX André. La disposition individuelle des galets dans les formations détritiques. *Rev. Géogr. phys. et Géol. dynam.*, t. XI, fasc. 3, p. 171-198, 11 fig., 2 pl., Paris, 1939.
8. CAILLEUX André. Action du vent sur les formations volcaniques en Islande. *Bull. Volc.*, II, V, p. 49-64, 10 fig., 8 pl., Naples, 1939.
9. CAILLEUX André. Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, XXI, 46, 1942.
10. COLLIN L. Formations quaternaires de l'Ouest du Finistère. *Bull. Soc. Géol. Min. Bretagne*, Fasc. spécial, p. 1-69, 4 pl., Rennes, 1936.
- 10 bis. DAGUIN. Guide de l'excursion géologique interuniversitaire, dans l'Aquitaine et sur la côte basque, p. 1-47, Bordeaux, Cadoret et Delmas édit., 1933.
- 10 ter. DUBOIS Georges et M^{me} Camille Dubois. — Premiers examens polliniques de tourbes littorales du Sud-Ouest de la France. *C. R. S. S. G. F.*, 16, p. 317-319, 21 nov. 1938, Paris.
11. EDELMAN C. H., FLORSCHÜTZ und J. JESWIET. Ueber spätpleistozäne und frühholozäne kryoturbate Ablagerungen in den östlichen Nie-

- derlanden. *Verhandelingen van het Geol.-Mijnb. Genootschap voor Ned en Kol.*, *Geol. Ser.*, XI, 4, p. 301-336, pl. I-IX, 4 fig., 1936.
12. FABRE A. Les terrains de revêtement du Médoc, p. 1-346, 54 fig., 24 pl., Bordeaux, Drouillard édit., 1939.
13. HARLÉ Édouard. Cailloux à facettes des environs de Bordeaux. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 3, 28, p. 70-71, Paris, 1900.
14. HARLÉ Édouard. Restes d'*Elephas primigenius* sous le sable des Landes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 4, X, 163-165, Paris, 1910.
15. KEILHACK K. Ueber Brodelböden im Taldiluvium bei Senftenberg und über das Alter der sie begleitenden Torf- und Faulschlammablagerungen. *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, 83, p. 184, 1931.
16. KESSLER P. Das eiszeitliche Klima und seine geologischen Wirkungen im nicht vereisten Gebiet. Stuttgart, 1925.
17. LEFFINGWELL K. Ground-ice wedges, the dominant form of ground-ice on the north-coast of Alaska. *Journ. Geol.* 23, 1915, p. 635-654.
18. LEFFINGWELL K. The Canning-river region, northern Alaska. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 109, 1919.
19. MALVESIN-FABRE. Recherches géologiques sur Léognan et la vallée de l'Eau Blanche. *Procès-verbaux Soc. Linn.*, Bordeaux, 22 nov. 1939, t. XCI, p. 159-172 et p. 175-184.
20. MILON Yves et DANGEARD. Sur l'importance des phénomènes de solifluxion en Bretagne pendant le Quaternaire. *CR. Ac. Sc.*, 187, p. 136-138, Paris, 2 juillet 1928.
21. SOERGEL W. Diluviale Frostspalten im Deckschichtenprofil von Ehringsdorf. *Fortschr. Geol. Pal.*, XI, 36 (Deecke Festschrift), p. 439, 1932.

LÉGENDE DE LA PLANCHE VI.

- FIG. 1. — Fente en coin quaternaire dans des alluvions anciennes. Dans celles-ci, galets dressés. Section verticale, coupant la fente obliquement. Le Vigeau, au N de Bordeaux.
- FIG. 2. — Galets dressés au sommet des alluvions anciennes de la Garonne (basse terrasse). Tout à fait en bas, sommet des alluvions *in situ*, à galets posés à plat, « gisants ». Section verticale. Courréjean, au S de Bordeaux.
- FIG. 3. — Galets dressés, vers le sommet des alluvions anciennes de la Garonne (basse terrasse). Des cailloux façonnés par le vent ont été récoltés au niveau du marteau, un peu plus haut et un peu plus bas. Au-dessus du marteau, gravier terreux à galets. Section verticale. Courréjean.
- FIG. 4. — Fente en coin, à remplissage de sable, dans les alluvions anciennes. Vers le sommet de celles-ci, galets dressés. Section transversale. Le Vigeau.
- FIG. 5 à 9. — Cailloux façonnés par le vent. Environs de Bordeaux et Libourne.
- Fig. 5. Le Vigeau ; terrasse de 40 m.
- Fig. 6. Le Vigeau ; terrasse de 40 m.
- Fig. 7. Courréjean ; basse terrasse.
- Fig. 8. Le Vigeau ; terrasse de 40 m.
- Fig. 9. Pomerol ; terrasse de 35 m.

Clichés J. Leriche (5 à 9) et A. Cailleux (1 à 4).

L'INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES VADOSES

PAR **H. Schoeller**¹.

SOMMAIRE.

Introduction. — Les facteurs climatiques. — La méthode employée, les statistiques et leurs graphiques. — Deux mots sur la solubilité des sels. — La composition chimique des eaux des différents terrains en fonction de la latitude. — *Conclusions* : Influence générale du climat sur la composition chimique des eaux.

INTRODUCTION.

Nul n'ignore que les eaux des sources, des puits de l'Afrique du Nord et du Sahara, ont une composition chimique toute différente de celles de nos pays. Et chacun sait que les eaux de nos montagnes sont plus pures que celles de la plaine. La composition chimique des eaux est donc influencée par le climat. Cela semble un fait bien acquis et pourtant aucune étude n'a encore été faite sur ce sujet, du moins à ma connaissance.

Les facteurs climatiques.

Quels sont les facteurs climatiques influençant la composition chimique des eaux et comment agissent-ils ?

La *pluviométrie* joue un rôle prédominant. Elle provoque un lessivage des terrains en entraînant les sels les plus solubles dans les circuits souterrains et superficiels, c'est-à-dire le Na Cl et le Ca SO⁴ parmi les plus importants des eaux. Le Ca CO³ comme nous le verrons, suit un autre régime, car, très faiblement soluble, il nécessite l'intervention d'un autre facteur tout à fait indépendant de la pluviométrie pour être mis en solution, la teneur en CO² libre de l'eau. Il restera donc d'autant moins de sels solubles dans les terrains que la pluviométrie sera plus forte. Enfin la pluviométrie provoquera une dilution d'autant plus grande des sels restants, passant en solution, que cette pluviométrie sera plus grande.

1. Note présentée à la séance du 3 novembre 1941.

Comme, en allant des régions tempérées aux régions tropicales, la pluviométrie diminue pour de nouveau augmenter vers les régions équatoriales, on doit donc s'attendre à une augmentation de la teneur en chlorures, sulfates et résidu sec en allant de France au Sahara, avec de nouveau une diminution vers l'Équateur. C'est ce que nous observerons d'ailleurs.

L'évaporation a une action aussi particulièrement nette sur la composition chimique des eaux. Par évaporation, la concentration des chlorures et des sulfates et par là le résidu sec de l'eau contenue dans la couche superficielle du sol augmentent. Cette eau plus ou moins renouvelée des profondeurs à la surface par capillarité, amène une véritable ascension des sels, d'ailleurs fort bien constatée dans les régions tropicales et subtropicales. Lorsque l'évaporation devient très intense, les sels en dissolution peuvent passer à l'état de sursaturation, et par précipitation former les croûtes calcaires (carapace de Pomel, tuf), les carapaces gypseuses et même les croûtes salines, suivant le degré d'évaporation. C'est le Ca CO_3 qui se précipite le premier, car il est presque toujours très voisin de l'état de saturation, ainsi que le démontrent nos recherches. Aussi voit-on le tuf se former le premier du côté tempéré de la bordure des déserts, tandis que le gypse qui demande pour précipiter une concentration plus poussée, donne des croûtes sur le côté désertique. Cela est très net en Afrique du Nord.

La concentration est particulièrement effective après les pluies faibles, insuffisantes pour descendre jusqu'aux nappes et qui ne font qu'imprégner les couches superficielles. Il se produit ainsi par un jeu successif de descentes avec dilution, et de remontées avec concentration de l'eau, une concentration progressive, si l'évaporation est particulièrement intense. Seules les fortes pluies entraîneront vers les nappes, en les diluant plus ou moins, ces eaux concentrées qui réapparaîtront aux sources. Mais rarement elles s'acheminent directement des sources vers la mer, par manque d'écoulement superficiel. L'effet de l'évaporation s'ajoute donc à celui de la faiblesse de la pluviométrie. Aussi dans les régions tropicales aura-t-on des eaux salées, séliniteuses et à résidu sec élevé, tandis que dans les régions tempérées les eaux seront peu chargées.

La température, déjà le facteur primordial de l'évaporation, joue un rôle très important dans les phénomènes chimiques. Elle favorise en particulier l'hydrolyse dans la décomposition des silicates et la mise en solution des éléments provenant de cette décomposition. De plus, elle active les mises en solution simple.

Enfin, concurremment avec l'humidité elle préside à l'activité des microorganismes du sol et à la combustion des matières organiques dont le résultat final est la production de gaz carbonique. Or ce gaz carbonique est le facteur essentiel de la décomposition indirecte de beaucoup de minéraux et de la mise en solution des carbonates alcalino-terreux.

Pour terminer, on trouvera ci-dessous quelques données climatiques des régions considérées.

	Pluviométrie	Évaporation ¹	Temp. moy. annuelle
France	1500 — 400	600 (Paris)	9 à 14°
N de la Tunisie	1200 — 600	2000	15-18
Centre de la Tunisie	600 — 400	2100	14-19
Régions des steppes de la Tunisie	400 — 100	2200	18-20
Régions sahariennes	< 100	2300 et plus	20-28
Régions équatoriales	> 1000		24-28

La méthode employée. — Les statistiques et leurs graphiques.

Pour examiner l'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines, nous avons employé la méthode statistique. Il a naturellement fallu éliminer l'influence de la nature du terrain aquifère ou de l'imperméable.

Nous avons donc disposé les analyses en plusieurs lots correspondant chacun à une nature pétrographique des terrains aquifères : calcaires, grès et sables, quaternaire, marnes et argiles, roches cristallines et cristallophylliennes.

Chacun de ces lots a été ensuite subdivisé en lots de deuxième catégorie correspondant chacun à une division climatique : France, Nord de la Tunisie, centre de la Tunisie, steppes de la Tunisie, Sahara, régions équatoriales.

Pour chacun de ces lots de deuxième catégorie, nous avons fait la statistique suivante : Pour chaque radical, Ca, Mg, Na, Cl, SO_4 , CO_3 combiné et le résidu sec, nous avons compté le nombre d'eaux ayant des millivalences comprises entre 0 et 1, 1 et 2, 2 et 3, 3 et 4, 4 et 5 et ainsi de suite. Afin de permettre les comparaisons, les chiffres obtenus ont été ensuite réduits de manière que le total des échantillons de chaque statistique soit de 100. Par manque de place, nous n'avons pas reproduit ces statistiques.

Nous aurions pu ensuite pour chaque radical chimique de

1. Chiffres très approximatifs.

	CO ³				SO ⁴				Cl		
	20 °/o	70 °/o	90 °/o	100 °/o	20 °/o	70 °/o	90 °/o	100 °/o	20 °/o	70 °/o	90 °/o
<i>Calcaires</i>											
France	3,2	5,0	5,7	8,0	0,2	1,0	1,6	4	0,2	1,0	1,5
N Tunisie	3,8	5,8	7,2	8,0	0,4	2,0	3,4	6	1,0	3,4	6,4
Centre Tunisie	5,2	6,4	7,0	10,0	1,2	4,4	14,4	27	2,6	7,4	17
Steppes —	4,0	6,4	9,0	11,0	1,4	7,2	18		1,8	8,2	15
Sahara	2,4	5,8	7,4	9,0	1,9	6,6	14,8	23	1,6	5,5	7,8
<i>Grès non acides</i>											
France	2,4	4,0	6,0	8,0	0,2	1,2	3,4	8,0	0,2	1,4	1,5
N Tunisie	4,2	6,0	7,0	8,0	0,3	1,4	2,6	8,0	1,5	6,0	9,5
Centre Tunisie	5,0	6,4	7,8	11,0	1,4	4,4	10,0	37	4,0	8,6	15
Steppes —	4,0	6,2	8,6	12,0	5,0	13,4	30,4	71	2,4	7,2	14
Sahara	2,1	4,2	6,3	15,0	9,4	35,0	53	75	13,1	42,5	55
<i>Grès acides</i>											
France	0,2	1,0	1,9	5,0	0,2	0,7	0,9	2,0	0,2	0,6	1,0
N Tunisie	0,3	1,3	1,0	3,0	0,2	0,7	0,9	1	0,4	1,2	1,8
<i>Marnes</i>											
France					26,2	42,2	59,0	51	2,0	3,6	4,5
Tunisie (N et Centre)	4,4	6,8	15,4	18	1,0	25,0	41,0	70	2,0	16,4	31
<i>Quaternaire</i>											
Alluvions France	2,2	4,2	5,0	7,0	0,4	1,4	2,8	5,0	0,2	0,6	1,0
Centre Tunisie	3,4	5,2	6,6	15,0	2,0	11,0	20,4	89,0	5,4	31,6	64,5
Steppes Tunisie	4,0	5,6	6,4	11,0	13,0	41,0	55	223	6,8	26,6	53,0
<i>Granite, gneiss</i>											
France	0,4	1,6	3,8	6,0	0,2	0,6	0,8	1,0	0,4	0,8	1,0

Ca 90 °/° 100 °/°	Mg 20 °/° 70 °/° 90 °/° 100 °/°				Na 20 °/° 70 °/° 90 °/° 100 °/°				Résidu sec (en mg) 20 °/° 70 °/° 90 °/° 100 °/°			
5,8 8,0	0,2	0,8	1,0	4,0	0,2	1,0	1,6	2,0	80	280	560	2400
7,6 9,0	0,6	1,4	2,8	3,0	1,0	2,8	4,4	6,0	200	300	480	200
12,4 25,0	1,4	3,6	7,0	18,0	22	5,6	14,0	36,0	520	900	1580	3500
13,0 46	2,6	6,6	12,5	35	1,6	8,0	14,8	17,7	520	1220	2000	15386
8,6 24	2,0	6,1	14,4	17,0	1,4	5,1	14,0	19,0	490	1160	3000	4700
6,7 9,0	0,4	2,0	3,0	5,0	0,7	1,6	5,0	7,0	180	500	700	800
8,6 10,0	1,3	2,4	3,3	7,0	1,3	5,4	7,2	8,0	380	860	1200	1300
12,0 29	3,0	5,6	8,4	17	2,4	7,6	14,0	66	620	1040	1700	9107
16,8 53	3,4	7	12	50	3,4	8,6	24,0	59	780	1540	2960	10052
32 50	6,3	15,0	30	74	8,6	32,0	54	91	1800	5100	9000	14000
2,7 4,0	0,2	0,8	1,0	2,0	0,2	0,9	22	7,0	60	180	500	700
1,2 2,0	0,2	0,7	0,9	1,0	0,2	0,7	0,9	1,0	40	120	180	200
42,4 43	2,8	6,0	7,4	8,0	3,2	8,2	8,8	9,0	2120 ?	3840 ?	4360 ?	4400 ?
26,0 30,0	1,6	10,8	25,0	40,0	1,8	21,4	39,8	69	640	2600	5700	7950
6,4 8,0	0,4	1,2	1,8	4,0	0,2	0,8	1,0	6,0	140	360	480	900
24,6 75,0	2,8	10,2	18,4	38	3,8	24,0	52,6	167	860	2820	4000	14190
32,0 45,0	8,2	19,8	32,4	147,0	9,8	31,0	65	530	1700	4200	7000	38070
1,4 4,0	0,2	0,6	0,8	1,0	0,4	1,0	1,8	3,0	60	160	200	500

chaque catégorie d'eau construire un graphique ayant en abscisse les millivalences et en ordonnée le pourcentage d'échantillons d'eau ayant ces millivalences. Les graphiques eussent été plus parlants. Mais la place nous faisant défaut, nous avons été obligé de porter en ordonnée les pourcentages cumulés, ce qui nous permet de rassembler plusieurs courbes sur un même graphique, mais demandera un effort supplémentaire de lecture dont nous nous excusons.

Chacun de ces graphiques comprend dans les faibles pourcentages et dans les pourcentages élevés, tous deux cumulés, des tracés plus inclinés que dans les pourcentages cumulés moyens qui, au contraire, se rapprochent plus de la verticale. De plus, les tracés relatifs aux pourcentages cumulés moyens sont approximativement rectilignes, en particulier entre les pourcentages 20 et 70. Cela veut dire qu'entre 20 et 70 %, 50 % d'eaux ont une teneur en l'élément considéré, ne variant qu'entre des limites étroites et qu'entre ces limites la répartition est à peu près égale. Tandis que pour les 20 % d'échantillons à faible teneur en millivalences et les 30 % d'échantillons à forte teneur en millivalences (les pour cents supérieurs à 70), les teneurs en millivalences oscillent beaucoup plus. Nous considérerons donc les 50 % d'échantillons compris entre les 20 % et 70 % cumulés comme caractéristiques.

Les tableaux (p. 270-271) donnent les millivalences correspondant à ces pourcentages de 20 et 70, auxquels nous avons ajouté les pourcentages de 90 et 100. Ou si l'on veut, en les lisant d'une autre manière, ils indiquent les pourcentages de 20, 70, 90 et 100 d'échantillons d'eau ayant moins de n millivalences indiquées dans les colonnes verticales.

Deux mots sur la solubilité des sels.

Les chlorures et les sulfates qui se trouvent dans les eaux, proviennent généralement de la simple mise en solution en particulier du chlorure de sodium et du gypse qui sont les sels les plus abondants. Comme ils ont une solubilité très grande, de 26,3 gr. par litre à 20° dans l'eau pure pour le Na Cl , de 2 gr. 10 par litre à 20° pour le Ca SO_4 , H_2O , ils peuvent donc se présenter en assez grande quantité dans les eaux. La concentration de l'eau en ces sels n'est limitée que par leurs produits de solubilité.

La dissolution du carbonate de chaux et du carbonate de magnésie se comporte par contre d'une manière différente. Ici encore

le produit de solubilité contrôle la dissolution. Le produit de solubilité est extrêmement faible. Mais les ions CO^3 qui rentrent dans ce produit de solubilité proviennent de la dissociation d'ions HCO^3 et ces ions HCO^3 de la dissociation de l'acide carbonique H^2CO^3 provenant du gaz carbonique dissous : ce dernier est lui-même fonction de la tension du gaz carbonique de l'air surmontant l'eau. Toutes ces relations peuvent être résumées¹ par l'équation suivante :

$$[\text{H}^2\text{CO}^3] = \frac{\alpha \delta}{22,41} = \frac{2K'_2}{K'_1 kc} \left([\text{A} =] - \frac{kc}{[\text{Ca}^{++}]} \right)^2 [\text{Ca}^{++}]$$

équation dans laquelle

$$(\text{A}) = \frac{(\text{HCO}^3)}{2} + (\text{CO}^3) = \text{CO}^3 \text{ combiné}$$

(H^2CO^3) = le gaz carbonique dissous dans l'eau (à l'état des gaz et d'acide).

δ = la tension du CO^2 de l'atmosphère surmontant l'eau,

α = le coefficient d'absorption du CO^2 ,

K'_1 = constante de la première dissociation de l'acide carbonique,

K'_2 = constante de la deuxième dissociation de l'acide carbonique,

kc = le produit de solubilité du carbonate de chaux,

les crochets indiquant les concentrations en mols. dans 1 kg d'eau.

Le gaz carbonique avec lequel les eaux souterraines sont en équilibre, est celui des sols agricoles. Or la tension de ce gaz carbonique ne varie dans ces sols qu'entre des limites assez étroites. Par conséquent le CO^3 combiné des eaux souterraines ne s'écartera que très peu d'une valeur moyenne. C'est ce que l'on observera de suite sur nos graphiques. Les courbes du CO^3 sont presque verticales ; le CO^3 ne dépasse guère 10 millivaleances ; tandis que les courbes du SO^4 et du Cl peuvent s'étaler très largement.

La composition chimique des eaux des différents terrains en fonction de la latitude.

Eaux des calcaires.

Les calcaires d'une manière générale n'ont pas de pores semblables à ceux des sables et de certains grès. La circulation la plus active se fait à l'intérieur des fissures. La surface d'attaque par voie chimique ou par dissolution se trouve ainsi considérablement réduite. De plus, les sels les plus solubles, les chlorures et les sulfates, sont emprison-

1. H. SCHÖELLER. Notions sur la corrosion interne des canalisations d'eau. *Ann. des Ponts et Chaussées*, Mém. n° 8, pp. 199-228, 1938.

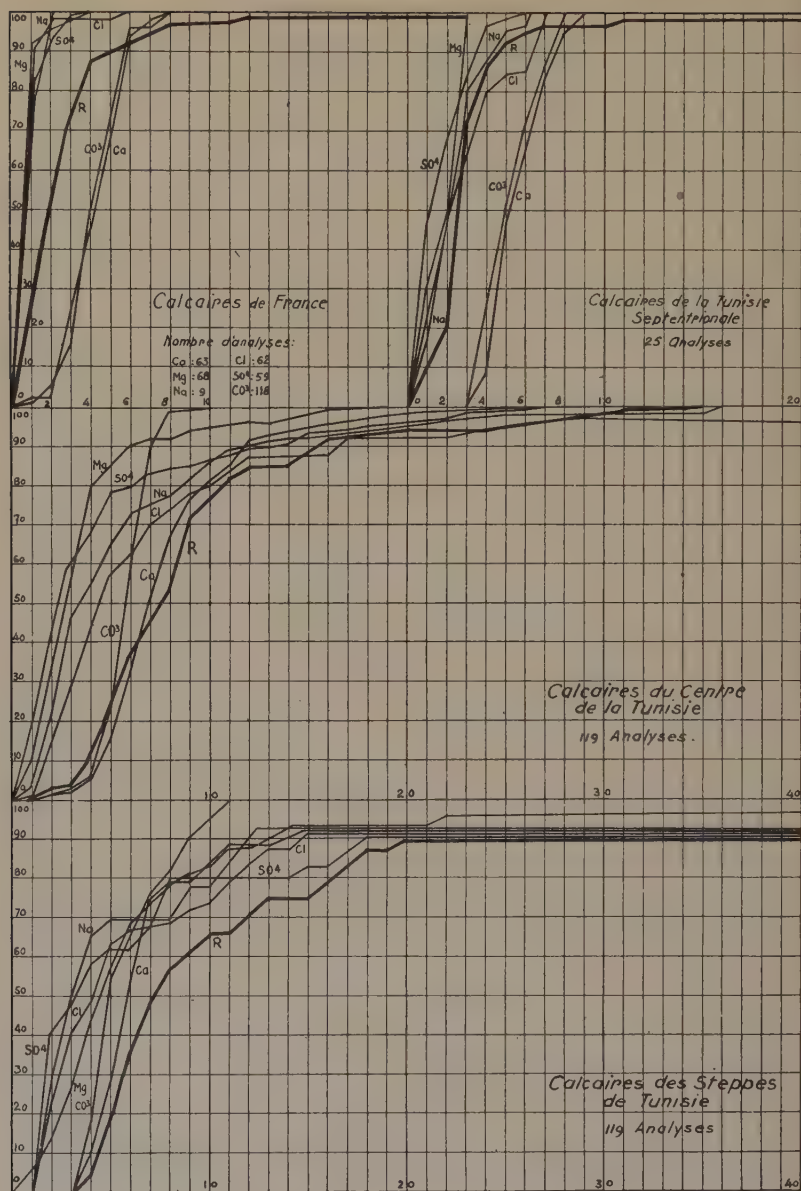


FIG. 1

En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalences.

nés dans la matière calcaire. Le manque de pores ne permet pas à l'eau d'aller les chercher en profondeur, tout au plus à quelques décimètres lorsque le calcaire subit une altération. Ces sels ne peuvent donc être mis en liberté que par la dissolution préalable des carbonates qui les emprisonnent. Aussi la composition chimique des eaux doit-elle refléter à peu près la composition chimique des calcaires. Mais la dissolution des carbonates étant beaucoup plus difficile que celle des sulfates et des chlorures et les surfaces d'attaque et de dissolution étant particulièrement réduites, il en résultera que le résidu sec sera relativement faible.

Examinons maintenant les variations des divers éléments :

En France, la teneur en CO^3 combiné n'oscille qu'entre 0 et 8 millivalences et pour 70 % d'eaux seulement entre 2 et 6; et pour les 50 % caractéristiques la teneur ne varie qu'entre 3,2 et 5 millivalences. Cette teneur caractéristique augmente très nettement de France jusque dans le centre de la Tunisie 5, 2-6, 4, pour de là diminuer jusqu'au Sahara (fig. 1 et 2 et tableaux p.270). C'est dans le centre et dans la région des steppes de Tunisie que l'on rencontre les plus hautes valeurs.

Les valeurs du SO^4 , de même que celles du Cl, sont toujours beaucoup plus faibles que celles du CO^3 combiné.

La teneur des 50 % caractéristiques, d'abord très faible en France, augmente graduellement de France au Sahara. Il en est de même des 70 % compris entre 20 et 90 %, mais avec cependant une diminution des hautes valeurs du SO^4 au Sahara.

La teneur en Cl des 50 % caractéristiques montre de même une augmentation du N au S. Mais cette augmentation cesse du centre de la Tunisie au Sahara.

Les valeurs du Ca sont essentiellement liées à celles du CO^3 combiné et du SO^4 . Comme en France le SO^4 n'a que de faibles valeurs ;

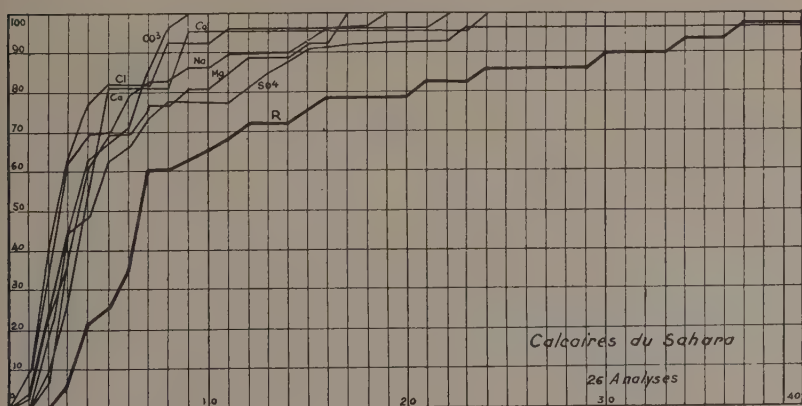


FIG. 2. — En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalence

les valeurs du Ca n'y suivent à peu près que celles du CO^3 combiné. Les 50 % caractéristiques augmentent graduellement de France jusqu'au centre de la Tunisie, puis diminuent jusqu'au Sahara. C'est là une variation parallèle à celle du CO^3 combiné, mais plus ample dans son accroissement par suite de la liaison avec celle du SO^4 .

Dans les eaux des calcaires, comme d'ailleurs dans la majorité des eaux des autres terrains aquifères, la teneur de Mg est inférieure à celle du Ca. Le Mg est lui aussi généralement lié au SO^4 , comme nos recherches hydrologiques nous l'on montré. Aussi n'y a-t-il rien d'étonnant à voir une augmentation graduelle du Mg, parallèle à celle du SO^4 de France au Sahara.

Na, lui, est généralement lié au Cl. En France ses valeurs sont donc plus faibles que celles du Ca. La teneur des 50 % caractéristiques augmente de France jusqu'au centre de la Tunisie; puis cette augmentation cesse pour ainsi dire vers le Sahara. C'est ce qui s'était d'ailleurs passé pour le Cl.

Le résidu sec montre un accroissement graduel du N au S.

Eaux des sables et des grès normaux.

Les sables et beaucoup de grès, étant des roches perméables à nombreux pores, la surface d'attaque du terrain aquifère est de ce fait grandement accrue, ce qui permet une dissolution plus rapide, par conséquent un résidu sec plus élevé de l'eau. Et ce résidu sec est d'autant plus élevé que l'eau par suite de sa circulation beaucoup plus lente se trouve plus longtemps en contact avec les terrains. Mais le résidu sec ne peut être supérieur à celui de l'eau des calcaires, que si le lessivage facilité par la grande porosité n'a pas été trop grand.

Lorsqu'on a affaire à des grès normaux, on constate que la teneur en CO^3 combiné est, à peu de chose près, la même que celle des eaux issues des calcaires, car les valeurs du CO^3 y sont réglées comme dans les calcaires par la pression partielle du CO^2 de l'atmosphère des sols.

La teneur en SO^4 et Cl est aussi en France très voisine de celle des eaux des calcaires. Cependant, certaines eaux issues des sables et grès peuvent avoir des teneurs en SO^4 et Cl supérieures aux teneurs maxima des eaux des calcaires, ce qui tient à la grande surface d'attaque offerte par les sables et les grès.

Le Ca, lié à CO^3 , est par conséquent à peu près le même dans les grès et sables que dans les calcaires. Par contre, les ions Mg et Na en relation avec les ions SO^4 et Cl peuvent avoir des teneurs maxima supérieures à celles des eaux des calcaires.

Examinons maintenant l'influence du climat sur la composition de l'eau :

Le CO^3 combiné semblable en France dans les grès et les calcaires évolue de la même manière vers le S dans ces 2 roches. On voit ainsi

les 50 % caractéristiques augmenter progressivement de France (2,4-4,0) jusqu'au centre de la Tunisie (5,0-6,4), puis de là diminuer progressivement jusqu'au Sahara (2,1-4,2). Ces valeurs sont donc extrêmement voisines de celles des calcaires. C'est là un fait extrêmement important sur lequel nous insistons. Comme pour les calcaires, les plus hautes valeurs se trouvent dans les régions méridionales.

Il y a une augmentation des 50 % caractéristiques progressive du SO_4 , de la France au Sahara. C'est ce qui se passait pour les calcaires. Mais ici l'augmentation est beaucoup plus rapide de (0,2-1,2) à (9,4-35) au lieu de (0,2-1,0) à (2,8-9,8), ce qui est dû aux plus grandes surfaces d'attaque et surtout à l'action plus intense de l'évaporation qui a plus de prise sur les sables et grès, en raison de la possibilité d'une remontée des eaux d'infiltration vers la surface par capillarité.

Comme pour le SO_4 , on constate une augmentation graduelle des 50 % caractéristiques du Cl de France au Sahara, avec cependant un fléchissement dans la région des steppes. Et là aussi pour les mêmes raisons, l'augmentation est beaucoup plus rapide que pour les calcaires (0,2-1,4) à (13,1-42,5) au lieu de (0,2-1,0) à (2,0-7,0).

Il y a augmentation des 50 % caractéristiques du Ca, qui passent de (2,2-5,2) en France à (8,0-23,1) au Sahara. Et cette augmentation est graduelle, alors que pour les calcaires il y avait diminution à partir de la région des steppes. En effet ici le Ca est lié non seulement au CO_3 comme dans les calcaires, mais aussi au SO_4 plus abondant.

Le Mg est d'une manière générale plus élevé que dans les eaux des calcaires, et là encore, il y a augmentation progressive du Nord au Sud. Les 50 % caractéristiques passent ainsi de (0,4-2,0) à (6,3-15,0).

Mêmes remarques pour Na qui passe de 0,7-1,6 à 8,6-32,0. Le résidu sec lui aussi augmente du Nord au Sud et ses valeurs se maintiennent constamment au-dessus de celles du résidu sec des eaux des calcaires.

Les grès et sables purement siliceux se comportent d'une manière différente de celle des sables ordinaires, surtout dans les régions à forte pluviométrie ayant permis un lessivage complet. L'absence de carbonates en particulier donne des eaux ayant un résidu sec très faible. Le CO_2 libre dissous, fonction de la pression partielle du CO_2 de l'atmosphère des sols, la même qu'ailleurs, donne certes un certain nombre d'ions HCO_3 et CO_3 par dissociation. Mais ceux-ci ne sont pas augmentés de ceux que fournirait la dissolution des carbonates absents de ces roches. Le CO_3 combiné est donc faible. Comme les ions Ca^{++} ne se trouvent qu'en très petite quantité, tout l'acide carbonique d'équilibre n'est pas saturé. Il reste par conséquent du CO_2 agressif. La teneur en Cl et en SO_4 , quoique pouvant être plus faible que dans les terrains calcaires par suite du lessivage, peut devenir égale à la teneur en CO_3 ou même le plus souvent la surpasser, simplement par faiblesse du CO_3 combiné. La teneur en Ca liée à celle du CO_3 est faible. Il en est de même de Mg. De ce fait, Na lié à Cl peut fort souvent dépasser Ca. De telles eaux acides se rencontrent

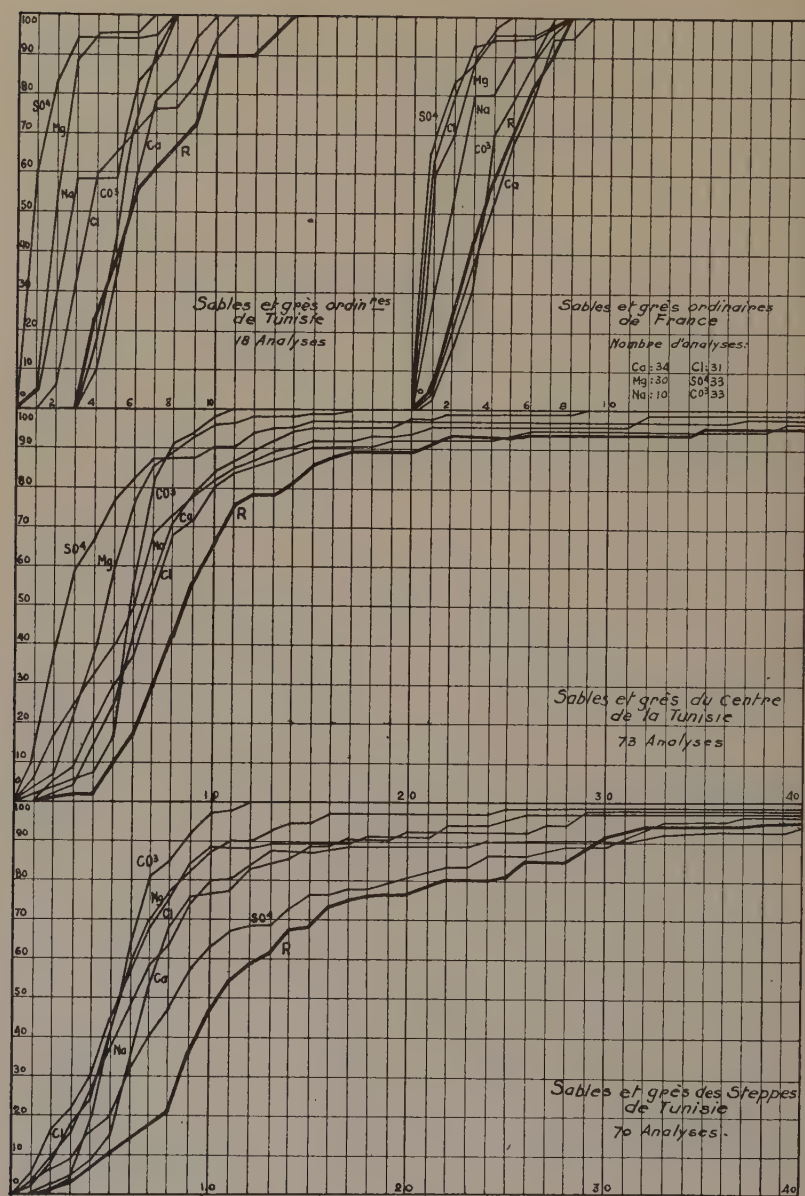


FIG. 3.

En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalences.

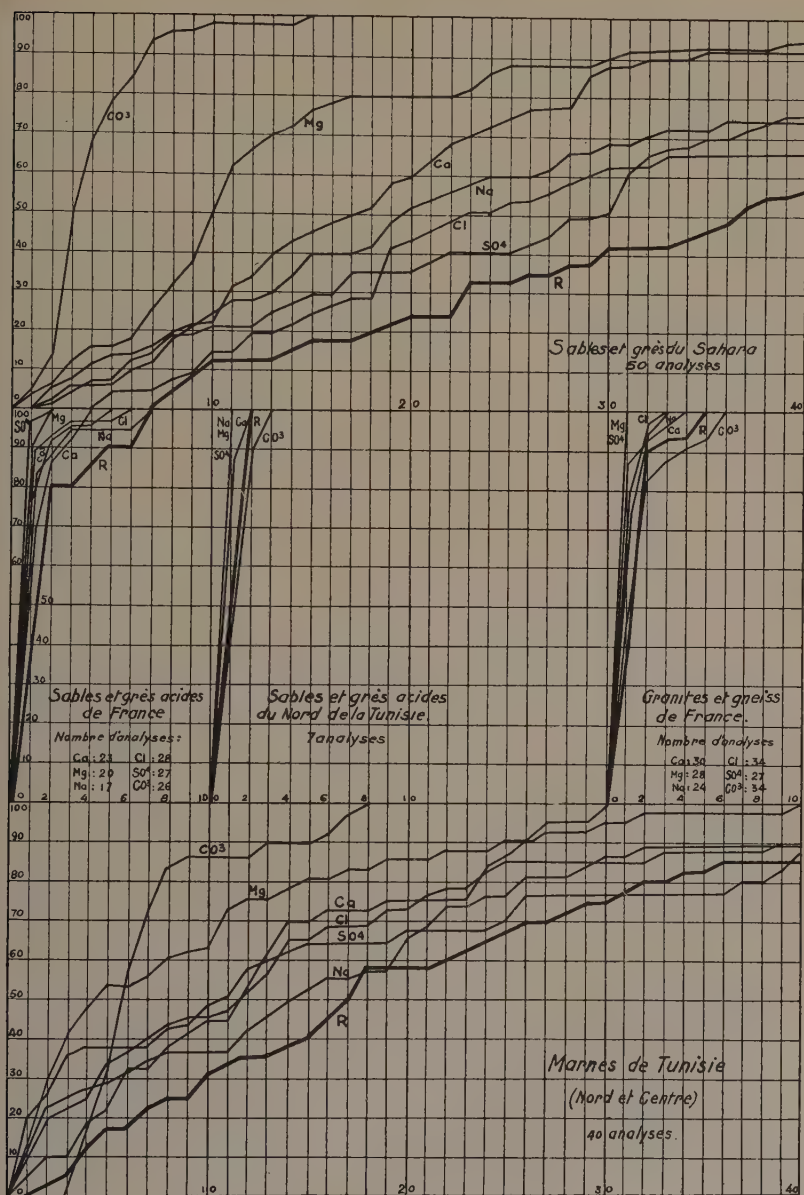


FIG. 4.
En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalences.

particulièrement dans la formation dite des sables des Landes dans une région à forte pluviométrie (1.000-1.500 mm.) et également en Afrique du Nord dans les grès oligocènes d'Ain Draham où la pluviométrie est de 1.600 mm. Ces deux régions ont des podzols, ce qui indique l'existence certaine d'une liaison entre la composition chimique des eaux souterraines et la nature pédologique du sol. Il serait heureux que ces liaisons fussent particulièrement étudiées.

L'insuffisance du nombre d'analyses en ma possession, ne permet pas de se rendre compte de l'influence climatérique. Nous voyons cependant qu'en Afrique du Nord où la pluviométrie est très élevée, on peut avoir des eaux moins chargées qu'en France. La pluviométrie n'est pas seule en cause. La nature du terrain a ici une action prépondérante, de même que la nature du terrain géologique a une influence fondamentale sur la nature pédologique du sol. Ainsi à Ain Draham, les eaux des grès oligocènes sont peu chargées et acides, tandis que celles qui sourdent dans les marnes éocènes (analyse 8) ont des eaux à résidu sec et à pH plus élevé :

	1	2	3	4	5	6	7	8	
Ca	10	12	9	10	21	7	5	221	1 = Source basse du 18 ligne.
Mg	7	3	5	8	15	8	4	35	2 = Source haute du 18 ligne.
Na	12	4	14	25	15	24	15	31	3 Fontaine des voleurs.
Fe				7					4 Source ferrugineuse.
Cl	40	32	32	36	56	60	30	41	5 Ain Bournaia.
SO ⁴	16	14	12	45	10	4	6	447	6 Ain Remla.
CO ³	6	7,5	9	9	33	6	6	134	7 Ain Draham.
rs	93	85	83	140	152	110	68	915	8 Source près du cimetière d'Ain Draham.
pH	5,0	5,35	5,4	7,0	5,9	5,05		7,3	Les chiffres, sauf ceux du pH, expriment des milligrammes
CO ²	42	54	47		71	105		34	par litre.

De même si dans le Bordelais les eaux des sables des Landes et celles des sables fauves sont nettement agressives avec des résidus secs de 100 à 200 mg, un CO³ combiné de 10 à 30 mg, des pH de l'ordre de 5 et 6, des teneurs en Ca de 5 à 40 mg, celles des autres formations sont tout à fait normales.

Granites et gneiss et la plupart des roches éruptives.

Ce que nous avons écrit sur les sables et grès acides précédents, peut en grande partie se répéter au sujet des granites, gneiss et la plupart des roches éruptives. Mais ici le lessivage est encore moins en cause, car le matériau est imperméable comme les calcaires, et l'attaque ne peut se faire que par la surface de la roche ou la surface des fissures et non dans de multiples interstices. Si ces roches cristallines et cristallophylliennes se comportent presque comme les précédentes au point de vue chimique, non par ses processus mais par ses résultats, c'est par suite de la difficulté d'attaque de ces roches essentiellement formées de silicates. L'hydrolyse est lente, beaucoup plus lente que la

mise en solution directe des chlorures et sulfates ou indirecte des carbonates. Il en résulte que très peu de cations Ca, Mg et souvent même Na passent dans l'eau. L'absence de carbonates dans la roche donne de la même manière que pour les sables et grès acides un CO^3 combiné très faible. Les eaux renfermant la teneur normale en CO^2 sont par conséquent agressives. Le résidu sec est faible.

Alluvions quaternaires.

Du point de vue hydrogéologique les alluvions peuvent être considérées comme des sables grossiers de nature complexe. Mais la comparaison des eaux du Quaternaire de France et de l'Afrique du Nord ne peut se faire d'une manière rigoureuse, car les terrains y sont quelque peu différents. Les alluvions de France sont surtout des dépôts de rivières et de fleuves remplissant les vallées ou couvrant les terrasses de ces vallées, tandis que le Quaternaire de l'Afrique du Nord a beaucoup plus l'habitus d'un manteau recouvrant non seulement le fond des vallées, mais aussi les pentes. Aussi ces nappes du Quaternaire de l'Afrique du Nord sont-elles beaucoup plus larges et surtout plus longues que celles de France. De plus, alors que les alluvions de France sont composées de sables grossiers et de galets, celles de l'Afrique du Nord sont surtout des sables fins et des limons.

Néanmoins, on constate les mêmes variations que dans les autres terrains, variations exagérées par la longueur des nappes et la multiplication des surfaces d'attaque. Le CO^3 combiné a partout ses valeurs restreintes réglées comme nous l'avons dit précédemment par la tension du CO^2 de l'atmosphère du sol agricole. On constate une augmentation légère des 50 % caractéristiques. Mais cette augmentation se poursuit jusque dans la région des steppes alors que pour les autres terrains elle s'arrêtait au centre pour de là diminuer vers le S. Tous les autres éléments SO^4 , Ca, Mg, Na, croissent du Nord au Sud. Seul le Cl semble arriver à l'étal entre le centre de la Tunisie et les steppes.

Marnes.

Les marnes ont d'une manière générale des résidus secs plus élevés que dans les roches précédentes. En effet, elles contiennent une grande proportion de sels retenus par adsorption lors de leur précipitation au fond de la mer. De plus, leur lessivage a été tout à fait incomplet en raison de leur imperméabilité relative. Enfin, la surface d'attaque étant énorme par suite de la finesse du grain et de la grande porosité de la roche (plus de 50 %), et la circulation étant excessivement lente, d'où une grande durée de contact, la concentration en sels par dissolution a pu être plus complète.

Le CO^3 combiné lui ne change pas, toujours pour les mêmes raisons. Mais les teneurs en SO^4 et Cl sont nettement supérieures à celles des autres terrains et dépassent le plus souvent le CO^3 combiné. Les

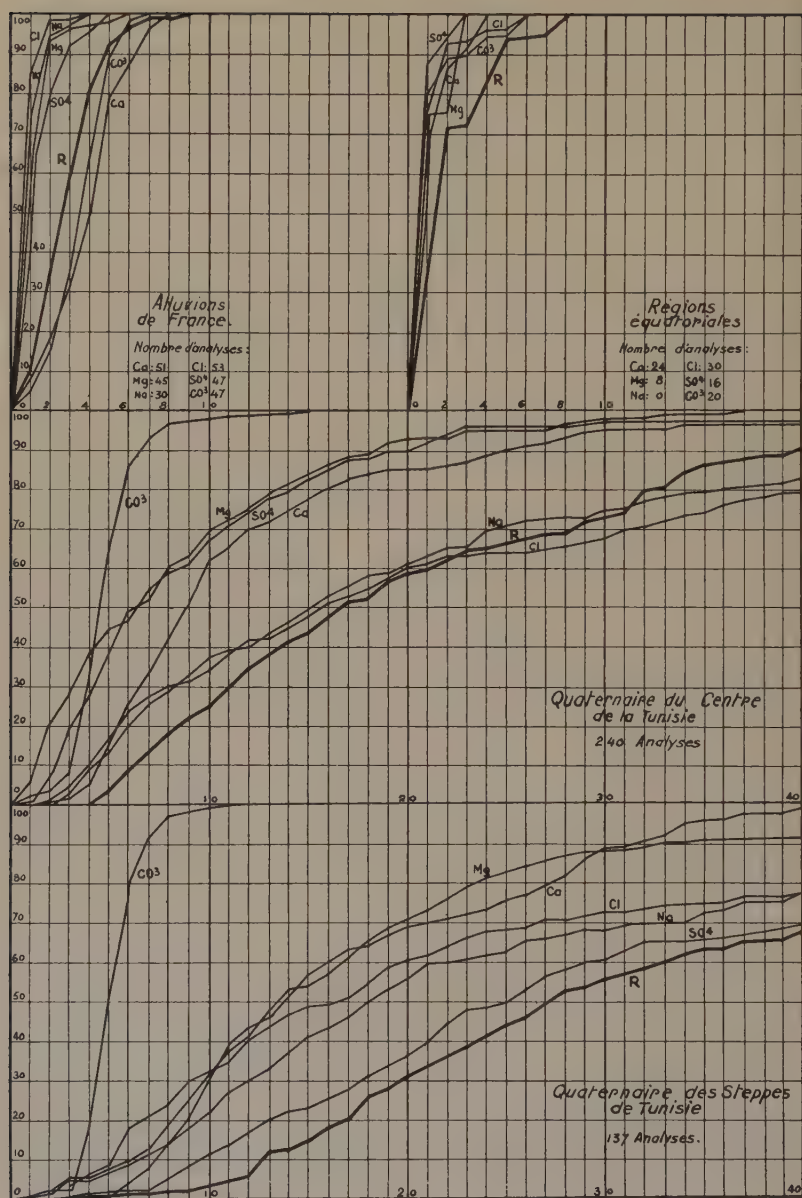


FIG. 5.

En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalences.

hautes valeurs en SO^4 amènent de hautes valeurs de Ca et Mg et les hautes valeurs de Cl, les hautes valeurs de Na.

Le peu que nous avons d'analyses de ces eaux en France montrent que les facteurs climatériques semblent jouer un rôle plus effacé que pour les autres roches, l'influence pétrographique étant ici prépondérante.

Terrains gypseux et salifères.

On arrive aux mêmes conclusions pour les terrains gypseux et salifères. Ici c'est la dissolution facile du gypse et des chlorures qui amène une grande teneur en SO^4 , Cl, Ca, Mg, Na sur laquelle il est inutile d'insister. Le facteur chimico-pétrographique a le pas sur les facteurs climatériques. Remarquons encore ici que la teneur en CO^3 combiné reste à peu près la même que dans les roches précédentes pour les mêmes raisons.

Eaux des régions équatoriales.

Nous n'avons pu avoir qu'un nombre restreint d'eaux des régions équatoriales. Aussi, avons-nous été obligé de bloquer ensemble les eaux de tous les terrains.

Malgré cela, il ressort très nettement le fait très important que les eaux des régions équatoriales se comportent dans la majorité des cas comme des eaux à résidu sec extrêmement faible. Tous les éléments Ca, Mg, Na, Cl, SO^4 y sont en proportion extrêmement réduite. Il en est de même du CO^3 combiné. Ces eaux présentent donc le faciès des eaux des roches cristallines ou cristallophylliennes et des grès acides. Les sols des régions équatoriales ou subéquatoriales, Sénégal, Soudan, Guinée, Côte d'Ivoire, sont d'après Franc de Ferrière et Nattier¹ en majorité acides. Les eaux doivent donc avoir aussi des pH faibles, montrant une certaine teneur en CO^2 libre qu'il serait intéressant de connaître.

Il est toutefois remarquable de constater que la présence de telles eaux coïncide avec une pluviométrie intense comme la plupart des terrains podzoliques, sables des Landes, grès oligocènes de Kroumirié, qui eux aussi donnent des eaux semblables, mais ici les sols sont plus généralement latéritiques.

Influence générale du climat.

Nous avons étudié séparément les eaux des différents terrains, calcaires, sables et grès, alluvions, etc... de manière à tenir compte de l'influence possible de la composition lithologique des terrains aquifères. Nous avons constaté dans chaque cas une évo-

1. FRANC DE FERRIÈRE et NATTIER. *Ann. agronom.*, livraison sept.-oct. 1932 et mars-avril 1933.

lution parallèle. Nous pouvons alors grouper ensemble toutes les analyses et exposer l'influence générale du climat sur la composition chimique des eaux souterraines, après avoir construit les graphiques non seulement avec les eaux précédentes, mais aussi avec toutes les eaux *incertae sedis* de telle ou telle région.

CO^3 combiné¹. — Alors que pour tous les terrains nous voyons les éléments Ca, Mg, Na, Cl, SO^4 et le résidu sec varier très largement non seulement d'une roche à l'autre, mais aussi en fonction du climat, le CO^3 combiné, lui, reste fixé entre des limites très étroites. Si l'on fait exception des marnes il ne dépasse pas dans le cas des eaux ordinaires 11 millivalences; 90 % n'ont pas plus de 8 millivalences. Enfin en ne tenant pas compte des eaux acides, 70 % des eaux ont un CO^3 combiné oscillant seulement entre 2 et 8 millivalences. De plus, pour tous les terrains, nous constatons que le CO^3 combiné augmente graduellement, mais très légèrement, de la France jusqu'au centre de la Tunisie où il atteint son maximum, pour diminuer de là vers le Sahara et plus loin vers les Régions équatoriales. Il est très vraisemblable que l'augmentation en direction des Tropiques se fait dès les régions polaires, car nous avons constaté par de nombreuses mesures de CO^3 combiné, aussi bien dans les Alpes que dans les Pyrénées, une augmentation graduelle au moins depuis 2.800 m. d'altitude jusqu'aux plaines.

La constance de la teneur en CO^3 combiné est due ainsi que nous l'avons déjà exprimé, à la constance de la pression partielle du gaz carbonique de l'atmosphère des sols. Le CO^3 combiné est en effet en relation pondérale directe avec cette tension, selon le mécanisme indiqué plus haut. Dans les sols agricoles, la tension partielle du CO^2 varie généralement de 0,005 à 0,06, ce qui donne précisément des teneurs en CO^3 combiné de 75 à 200 mg à la température de 15°, entre lesquelles oscillent le plus généralement les teneurs en CO^3 combiné des eaux souterrainées. Cette relation est donc bien prouvée et certaine.

Le gaz carbonique des sols provient en particulier de la respiration des microorganismes, des racines des végétaux, et de la décomposition des matières organiques du sol. Plus la végétation est abondante, plus la vie des microorganismes dans le sol est intense, plus la production du CO^2 est grande, sa tension élevée, et par là plus le CO^3 combiné est grand. La teneur en

1. Ici nous n'avons tenu compte dans nos graphiques que de l'eau des sources afin d'éliminer l'influence soit de l'évasion du CO^3 , soit la production de celui-ci par les matières organiques qui y séjournent.

CO^3 combiné des eaux sera donc bien modifiée dans tel ou tel sens par les actions climatiques. En effet, l'abondance de la végétation et l'intensité de la vie des microorganismes, croissent avec la température de l'air et la pluviométrie (bien entendu jusqu'à certains optima).

De France au Sahara, il y a une diminution constante de la pluviométrie, mais par contre une augmentation graduelle de la température moyenne annuelle. Les deux facteurs varient donc en sens inverse l'un de l'autre en allant du Nord au Sud ou du Sud au Nord. Si les courbes représentant pour chacun de ces phénomènes climatiques la production du CO^2 (en ordonnée) en fonction de la longitude (en abscisse) sont des lignes paraboliques, ce qui est des plus probables, la production du CO^2 devra augmenter du Nord au Sud, passer par un maximum puis diminuer. C'est ce que l'on observe ainsi que cela se voit sur les statistiques du CO^2 libre.

De France au centre de la Tunisie, la pluviométrie diminue et avec elle la végétation qui devient de moins en moins serrée malgré la température croissante. Mais l'activité des microorganismes et la combustion des matières organiques augmentent avec la température et produisent des quantités de plus en plus élevées de gaz carbonique, d'où un accroissement graduel du CO^3 combiné du Nord au Sud. La température devient ainsi le facteur de contrôle.

Du centre de la Tunisie au Sahara, la pluviométrie diminue toujours de plus en plus. Elle devient de plus en plus insuffisante. La végétation se raréfie progressivement malgré la température croissante et n'apporte plus le matériel organique à décomposer sur lequel pourrait se porter l'activité des microorganismes. La réduction de plus en plus grande de ce matériel entraînera une diminution de la production du CO^2 . Ce mouvement du CO^2 libre, nous l'avons constaté parallèlement au mouvement du CO^3 combiné.

Le CO^3 combiné présente une diminution très sensible dans les régions équatoriales. Dans ces régions à haute température et à haute pluviométrie, la végétation se développe avec luxuriance et a priori c'est dans ces régions que la vie des microorganismes doit être poussée au plus haut point, et où l'on doit s'attendre par conséquent au maximum de production du CO^2 . Pourtant, les quelques analyses que nous avons des eaux de ces régions n'indiquent qu'une teneur très faible en CO^3 combiné. Peut-être est-ce dû au lessivage intense provoqué par la haute pluviométrie qui aurait éliminé les sels les plus solubles, y compris les carbonates.

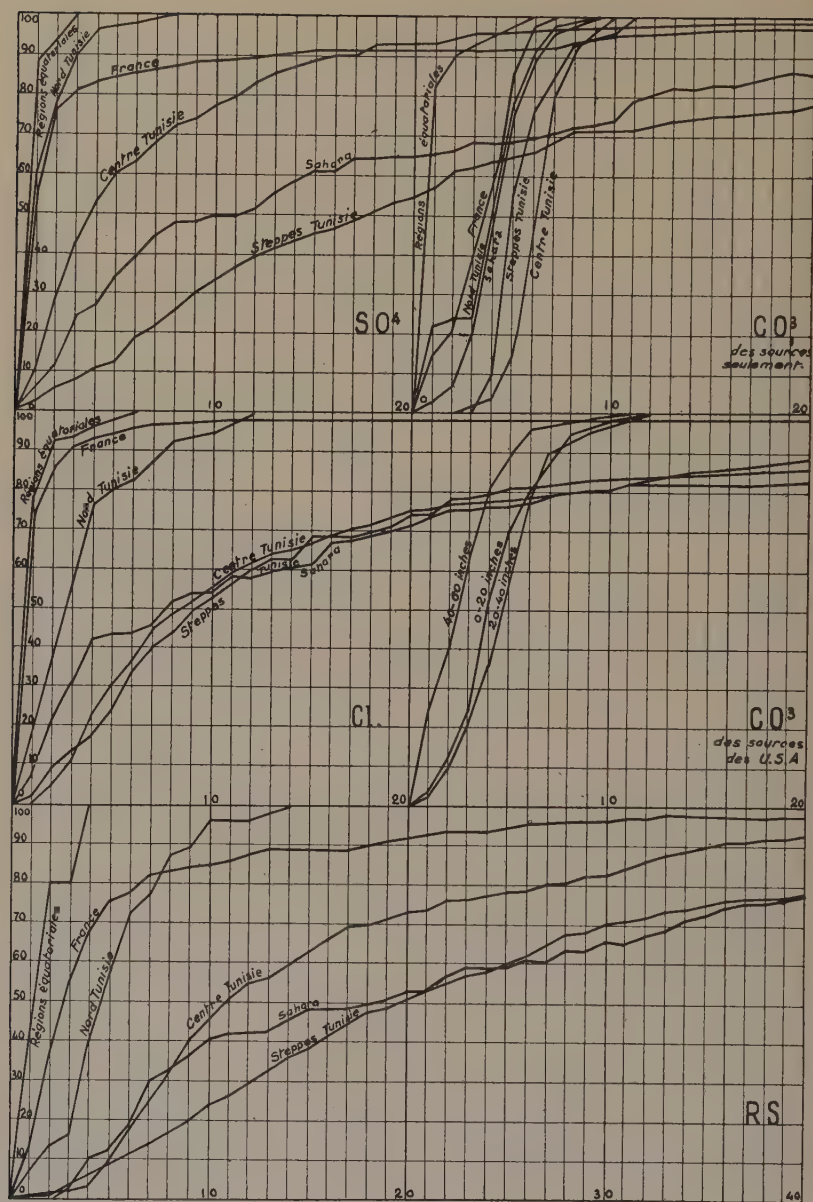


FIG. 6.

VARIATIONS GÉNÉRALES

En ordonnée % cumulés ; en abscisse millivalences.

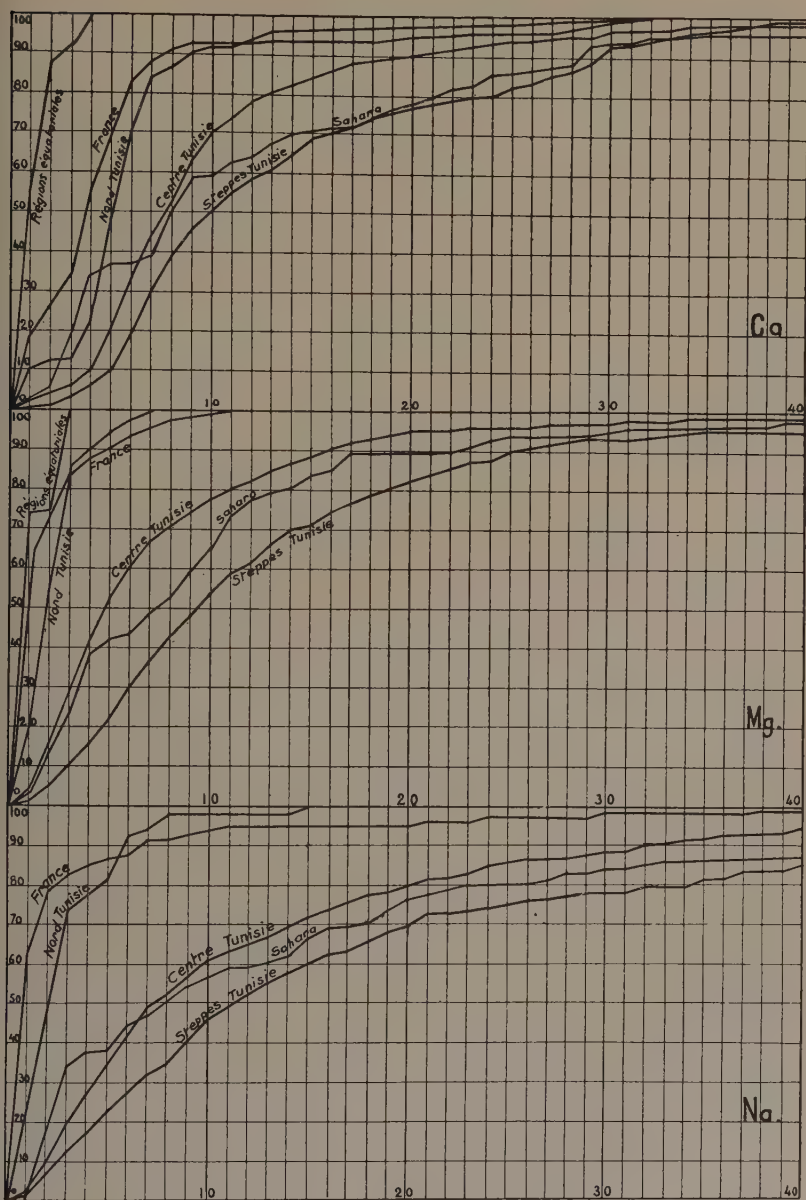


FIG. 7.

VARIATIONS GÉNÉRALES

En ordonnée % cumulés; en abscisse millivalences

SO⁴ et Cl. — Alors que SO⁴ et Cl sont extrêmement faibles en France, nettement inférieurs au CO³ combiné, ils croissent rapidement vers le Sahara. Dans le Nord de la Tunisie, ils sont encore généralement inférieurs au CO³ combiné. Mais à partir du centre de la Tunisie, dans les steppes et au Sahara, ils le dépassent nettement. Le SO⁴ croît plus lentement que le Cl du Nord au centre de la Tunisie et ensuite plus rapidement. De telle sorte que le rapport SO⁴/Cl qui en France était voisin de 1, mais nettement inférieur à 1 dans le Nord et le centre de la Tunisie, se rapproche graduellement de l'unité pour souvent la dépasser dans la région des steppes et du Sahara.

La croissance plus rapide du Cl que celle du SO⁴ est en accord avec les facteurs climatériques. L'augmentation de l'évaporation concomitante avec la diminution de la pluviométrie, ne peut qu'amener une concentration des sels d'autant plus importante que ces sels sont plus solubles, la vitesse de dissolution étant proportionnelle au déficit de saturation. L'augmentation plus rapide du Cl que du SO⁴ est donc normale. Il reste donc à expliquer l'augmentation plus rapide de la teneur en SO⁴ des eaux des steppes et du Sahara. Elle n'est plus en liaison avec des facteurs climatériques, mais avec des modifications lithologiques. En effet, c'est dans ces régions des Steppes et du Sahara que maints terrains prennent des faciès néritiques avec intercalations dolomitiques et gypseuses comme c'est le cas notamment pour l'Albien, le Cénomanien, l'Éocène et même parfois le Vindobonien. Ce sont ces intercalations gypseuses qui apportent un tribut considérable de SO⁴ et donnent leur faciès à ces eaux.

Dans les régions équatoriales, nous retrouvons au contraire un taux extrêmement faible de SO⁴ et de Cl, inférieur même à celui de la France. Nul doute que cela est dû à la forte pluviométrie qui a provoqué un lessivage intense de tous les terrains.

Ca, Mg, Na. — Les modifications des anions entraînent celles des cations. La variation du CO³ combiné est négligeable à côté de celles des ions SO⁴ et Cl. Ce sont donc ces variations de SO⁴ et Cl qui amèneront une variation des cations.

En France, le Ca est déjà à un taux relativement élevé. Cela tient à ce qu'il est surtout en liaison avec le CO³ combiné. De France il augmente graduellement jusqu'au Sahara. Mais cet accroissement est dû non à une augmentation du CO³ mais à celle du SO⁴. Toutefois, on constate pour les calcaires un étal du centre au Sahara, ce qui provient de l'action prédominante du CO³ dans les eaux calcaires peu chargées en sulfates et le CO³ diminuant dans cette direction.

Le *Mg* faible en France augmente pour toutes les roches de France au Sahara, car il est aussi en liaison avec les ions SO^4 . On devrait donc s'attendre comme pour le *Ca* à un étal pour les eaux des calcaires dans les steppes et le Sahara. Mais dans ces régions les dolomies abondent, l'influence lithologique masque alors l'influence climatérique.

Le rapport Mg/Ca est comme le rapport SO^4/Cl caractéristique des eaux d'un terrain dans une zone climatérique donnée. L'influence climatérique a plutôt tendance à l'augmenter, car Mg/Ca croît en effet avec la concentration des eaux et en particulier avec celle des sulfates. J'ai constaté en effet que les hautes valeurs du rapport Mg/Ca sont toujours liées aux hautes valeurs absolues du SO^4 qui amènent toujours du *Mg*. Le produit de solubilité (SO^4) (*Ca*) ne peut en effet dépasser une certaine valeur qui limite la teneur en *Ca*. Tout accroissement de SO^4 ne peut donc amener en même temps qu'une élévation du *Mg*, un abaissement du *Ca*. On ne constate qu'une faible augmentation de France au centre de la Tunisie, car le SO^4Ca y est encore le plus souvent assez loin de la saturation.

L'augmentation est par contre très nette dans la région des steppes et le Sahara. Mais l'influence climatérique y est en grande partie voilée par l'influence lithologique qui, ici, l'exagère, en raison de la grande abondance des roches magnésiennes dans ces régions.

Le sodium est d'une manière générale lié au *Cl* et subit par conséquent son sort. Aussi voyons-nous dans tous les terrains une augmentation graduelle de France au Sahara. Il faut toutefois faire une exception pour les eaux des calcaires du Sahara. On peut attribuer cette exception au fait que nous n'avons eu à notre disposition qu'un petit nombre d'échantillons des eaux de ces calcaires, comme le montre d'ailleurs le tracé irrégulier avec paliers des courbes.

Tous ces cations *Ca*, *Mg*, *Na* sont de nouveau en très faible quantité plus au Sud, dans les régions équatoriales par suite du lessivage intense dû à la pluviométrie.

Résidu sec. La conséquence de ces différentes variations se traduit par une augmentation graduelle du résidu sec de France au Sahara et une diminution dans les régions équatoriales.

OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES DANS LE MOZAMBIQUE MÉRIDIONAL

PAR **Marian Książkiewicz.**

Cette note présente un compte rendu préliminaire d'observations géologiques¹ faites au N-E de *Macequece*. Nos études ont porté plus particulièrement sur la région située au Nord de la rivière Revue, qui s'étend sur les deux versants de la haute vallée du Muza et sur le cours moyen de la rivière Chimesi, où l'auteur a établi une carte géologique en utilisant, en partie, la carte topographique au 1:20.000 éditée par la « Companhia de Moçambique ».

Ces observations ont permis de réunir beaucoup plus de renseignements sur la constitution géologique de cette région, que l'on n'en possédait jusqu'ici d'après les études sommaires de A. Sawyer et F. Andrade.

Dans les environs de Macequece, les granites, transformés en gneiss, occupent de vastes territoires entre lesquels s'étendent des bandes de roches éruptives et sédimentaires. Une bande ainsi constituée s'étend au Nord de Macequece et constitue le prolongement de la zone aurifère de la région d'Umtali (Rhodesia du Sud) étudiée récemment par E. Phaup².

Au NE de Macequece ces formations ont une direction E-W, qui, à une distance d'environ 20 km au N-E de Macequece se change en N-S. La largeur de cette zone atteint 10 km, et elle est limitée des deux côtés par des granites et des gneiss.

Dans la composition de cette bande on peut distinguer deux séries.

La série inférieure comprend :

1) Des schistes chloriteux, des phyllites vertes ou sombres, très dures.

2) Des quartzites ferrifères rubannées³. Ce sont des quartzites alternant avec de minces intercalations de magnétite et d'héma-

1. Il n'est pas possible à l'auteur dans les circonstances actuelles d'étudier les matériaux et de mettre au point ses observations.

2. *Geological Survey of Southern Rhodesia, Bull.* 1937.

3. « Banded Ironstone » des géologues anglais.

tite. Elles sont parfois accompagnées de schistes argileux sombres, qui s'étendent quelquefois aux dépens des quartzites.

3) Des calcaires cristallins, clairs ou tachetés, parfois passant à des roches cristallines calcaires et siliceuses. Ces calcaires ne forment pas un niveau défini, mais des complexes lenticulaires qui se développent entre les zones 2 et 4.

4) Des quartzites en gros bancs et des schistes quartzitiques, habituellement de couleur claire, qui forment, semble-t-il, le niveau le plus jeune de la série. Elles constituent habituellement dans la morphologie des crêtes rocheuses caractéristiques.

5) A la série inférieure appartiennent encore des roches séricito-quartzéuses, qui affleurent sur la rivière Chimesi, mais leur rapport avec les formations énumérées ci-dessus sous les numéros 1 à 4 n'a pu être établi.

La série inférieure a été traversée par des roches intrusives, souvent à tel point que les roches sédimentaires ne forment plus que de petites lentilles au milieu des roches magmatiques. Celles-ci ont été antérieurement métamorphisées.

Au point de vue pétrographique on peut distinguer 3 types de roches :

A. Des diabases, altérées en roches en partie schisteuses (épidiabases), sombres et à grain fin. Elles apparaissent principalement dans la vallée du Muza.

B. Des roches du type des péridotites massives, en partie altérées en serpentine.

C. Des roches talqueuses, passant à des schistes talqueux, qui sont le produit de la transformation de roches du type B, auquel les roches talqueuses sont visiblement liées par des passages.

Les roches péridotitiques et talqueuses forment deux larges bandes des deux côtés de la rivière Muza, dans lesquelles les péridotites forment des massifs ovoïdes, entourés par les schistes talqueux. Dans la bande septentrionale les schistes dominent, alors que ce sont les péridotites dans la zone méridionale. En dehors de ces deux bandes principales, il y en a quelques autres moins importantes.

Dans la région étudiée, il n'a pas été possible, faute de données, de se rendre compte si les épidiabases sont plus anciennes que les roches ultrabasiques ou si c'est l'inverse, mais dans la Rhodésie du Sud, Phaup a montré que les serpentines et les schistes talqueux sont plus jeunes que la série des roches vertes « greenstones » à laquelle correspondent vraisemblablement nos épidiabases.

Sur la série précédente de roches sédimentaires et magmatiques, transgresse une série plus récente qui comprend :

1) Des conglomérats à éléments de quartzites ferrifères, de quartzites, plus rarement de serpentines, avec parfois un ciment talqueux. Ces conglomérats, généralement très laminés, forment des montagnes élevées (p. ex. le Chiromiro, qui dépasse 1.600 m.). Des grès accompagnent les conglomérats. Ils passent en haut à :

2) des schistes argileux, sombres, renfermant parfois de faibles intercalations de quartzites ferrifères, mais qui n'atteignent cependant jamais un développement comparable à celui qu'elles ont dans la série inférieure.

La série inférieure apparaît dans la partie septentrionale d'une zone formant un synclinal étroit, implanté en coin dans la série inférieure. Elle est moins métamorphique que la série inférieure, et correspond sans aucun doute à la série de Mbeza de la région d'Umtali.

Les roches magmatiques, développées sous la forme de granites à biotite et de roches basiques sombres, voisines des diabases sont plus récentes que cette série.

Les granites bordent la zone des roches précédemment décrites. Ce sont fréquemment des granites porphyriques, plus ou moins transformés en gneiss. Ils sont en contact, dans la région étudiée, seulement avec la série inférieure, mais les veines de quartz qui sont liées avec eux, apparaissent aussi dans la série supérieure. En outre, dans la série inférieure apparaissent de petits massifs et des filons de granite semblables, mais de faciès microgranitique. Ces granites ne sont pas gneissiques.

Il y a une quinzaine d'intrusions de ce type, particulièrement nombreuses dans la partie N du bassin du Muza, où de petits filons de granite, de quelques mètres à une quinzaine de mètres d'épaisseur, sont disposés en auréole autour d'un massif granitique un peu plus important.

Les diabases forment des filons étroits de quelques centaines de mètres de longueur, recoupant également les séries inférieure et supérieure et les granites. Ces filons ont une direction voisine de N-S, ou bien forment de petits massifs ovoïdes. Ils sont peu nombreux et sont les plus récents.

L'âge des roches sédimentaires de la région étudiée correspond au Précambrien (*système du Swazi*).

A l'Est de Macequece s'étend une chaîne montagneuse, de direction N-S, passant par la localité de Bandula et par la chaîne de Chicamba qui se relie aux monts Clara. Cette zone est constituée par des granites gneissiques, au milieu desquels s'étendent

des bandes de quartzites à gros grains et en gros bancs, à pendage isoclinal vers l'Ouest. Au milieu des gneiss apparaissent aussi de petites bandes d'amphibolites, ainsi que des massifs de roches basiques non métamorphiques. Au milieu des quartzites, qui renferment fréquemment de la muscovite et de la tourmaline, et s'intercalent de schistes à muscovite, apparaissent également des quartzites ferrifères avec hématite et magnétite.

ÉOCÈNE ET QUATERNAIRE SOLIFLUÉS DE PONTPOINT (OISE)

REMARQUES GÉNÉRALES SUR LA SOLIFLUCTION

PAR Étienne Patte¹.

Lorsque l'on gravit le versant entre la route basse qui, au pied de la pente, se dirige vers le hameau de Saint-Gervais, et la grand'route de Pont-Sainte-Maxence à Verberie (Oise) on peut faire les observations suivantes (fig. 1).

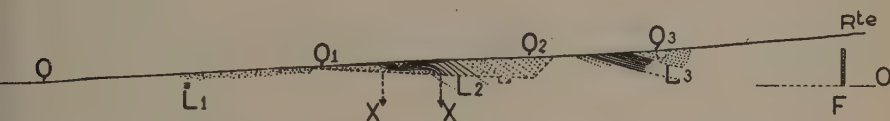


FIG. 1 a. — Coupe générale de l'Éocène et du Quaternaire à Pontpoint (Oise).
(Échelle : 1/2 mm par mètre).

La coupe va de la plaine inondable (O) à la Route de Verberie (R).

OO = niveau du lit majeur.

L1, L2, L3 = couches éocènes.

Q1, Q2, Q3 = graviers quaternaires.

XX = niveau de la coupe détaillée.

F = forage du château de Saint-Gervais.

Les graviers Q2 à pendage très régulier de 30° vers le Sud indiquent une coulée en masse très régulière.

Tout d'abord, un trou creusé au niveau et au Sud de la route basse permet de voir 2 m de sable des Lignites (L_1). Plus au Sud, deux tranchées parallèles NS permettent de voir les sables quaternaires (Q_1) bien caractérisés par leur composition hétérogène (Nummulites), ces sables sont situés à un niveau légèrement supérieur au Sable éocène L_1 ; ils sont d'autre part recouverts par de l'Éocène pendant vers le Sud de 30° à 45° (L_2) dans la tranchée W. Dans la tranchée E, s'observe le même fait et c'est ici que j'ai relevé la coupe très compliquée ci-jointe. Cette coupe est visible sur les deux versants de la tranchée du chemin de fer à voie étroite. Ici l'Éocène forme une vraie nappe de charriage et un bloc à *Nummulites laevigatus* indique l'extension du Quaternaire (Q_1) jusque sous la racine même de cette nappe. Cette masse charriée L_2 disparaît à son tour, sous une nouvelle masse de sables quaternaires (Q_2) très bien stratifiés avec pendage régu-

1. Note présentée à la séance du 9 juin 1941.

lier vers le Sud (les graviers paraissent horizontaux sur la coupe EW). Le pendage de ces sables quaternaires est plus fort à l'E qu'à l'W ; il est de 15° à l'W, de 30° à l'E. Plus au-dessus, la présence des argiles éocènes est indiquée par une petite mare ; dans un élément abandonné de la carrière, j'ai retrouvé cette couche L₃, épaisse de 3 m et inclinée de 15° vers le S. Elle supporte les sables et graviers quaternaires (Q₃) visibles à la mare. Nous avons donc rencontré 3 niveaux d'argile des lignites, plissés ou inclinés, et 3 niveaux de sables fluviatiles quaternaires alternant. Une autre indication m'a été fournie en 1937 : un forage de puits très large a rencontré 8 m de sable quaternaire contre la grand'route, à l'W du petit château dit de Saint-Gervais, 750 m à l'W environ de l'église de Pontpoint. Les inondations de l'Oise peuvent atteindre la route basse, bien qu'elles s'arrêtent en général 1 m plus bas.

Malgré ces précisions, cette coupe peut recevoir plusieurs explications.

On pourrait supposer qu'il y a eu vraiment 3 terrasses alluviales et que les deux terrasses supérieures se sont écoulées sur l'inférieure en entraînant, sous elles, leur substratum éocène. Si nous tenons compte des 8 m d'alluvions (sans intercalation d'Éocène) rencontrés par le forage, cette hypothèse n'est soutenable que si nous admettons un glissement accompagné d'un affaissement en masse de la terrasse supérieure.

On peut, à l'inverse, supposer qu'il n'y a eu primitivement qu'une terrasse et qu'au cours de son glissement elle s'est transformée en 3 écailles séparées. Le long de chaque plan de poussée ou mieux de glissement, les deux écailles supérieures auraient entraîné une partie de leur substratum éocène sur l'écaille située au-dessous.

On peut admettre, comme variante, que les sables inférieurs Q₁ sont en place et que seuls Q₂ et Q₃ ont glissé, Q₂ et Q₃ représentant soit 2 terrasses différentes et ayant glissé, soit 2 écailles distinctes issues d'une même terrasse.

La nature des éléments alluviaux ne paraît pas indiquer des dépôts d'âge différent, mais ce n'est pas un argument convaincant. Je suppose néanmoins que Q₂ et Q₃ ne correspondent qu'à une même masse. Après leur dépôt, ces alluvions étaient en équilibre sur leur substratum éocène. Après le creusement de la vallée qui transformait ces alluvions de fond de vallée en terrasse, il s'est produit une poussée au vide et le glissement s'est produit.

Je n'ose pas préciser la signification des sables fins et sales qui recouvrent la grande coupe. Je suppose qu'ils correspondent à

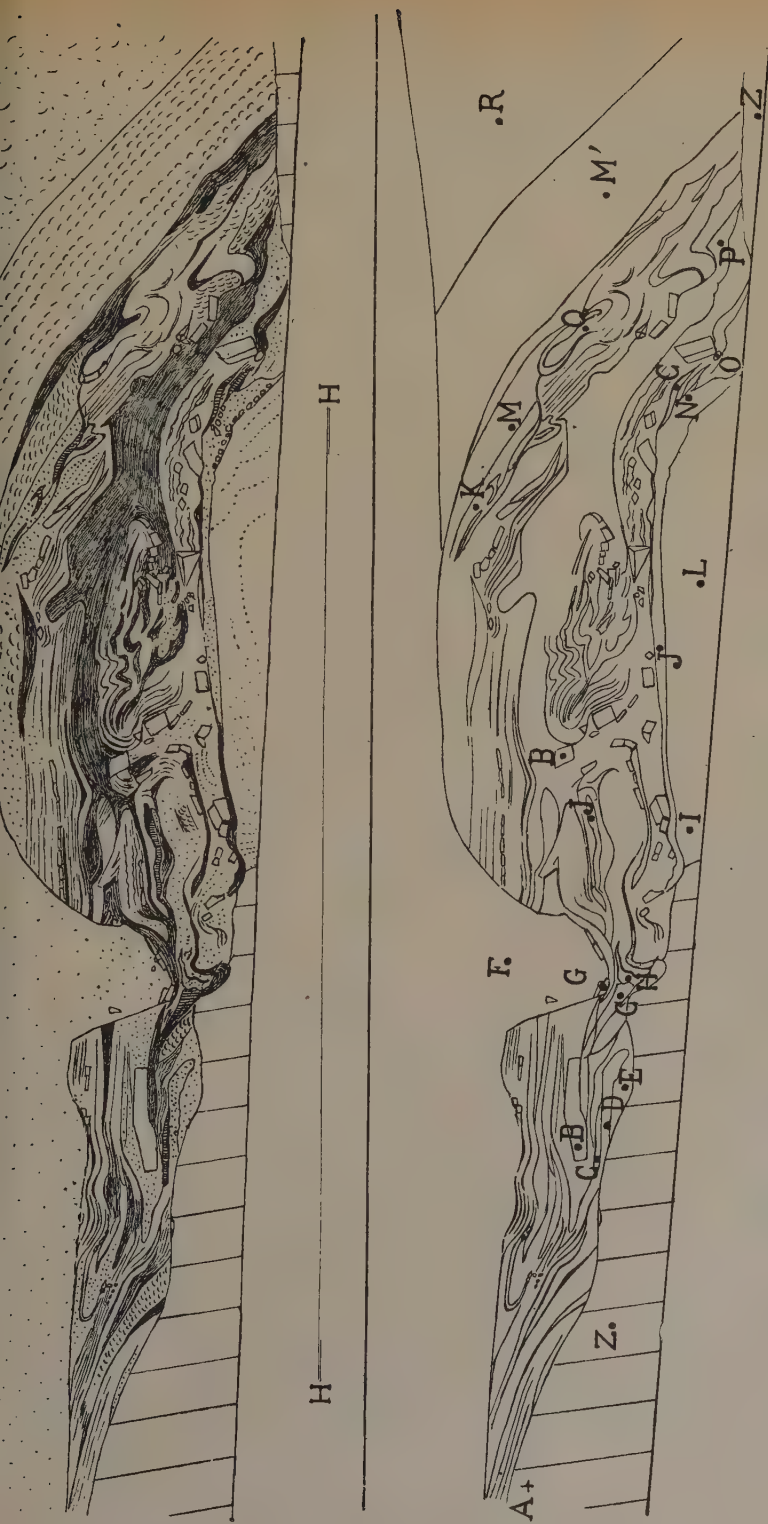


Fig. 1 b. — Coupe détaillée des couches en XX. HH = horizontale. Échelle : 2 cm. par 3 mètres.

Les contours simples polygonaux indiquent des blocs de grès éocènes (B). Les couches avec hachures verticales sont les niveaux à cendres (C).
A. En A : Sable à graviers, *quaternaire*, recouvert par l'Eocène et masqué par les éboulis (Z). Le même sable s'observe 2 m. plus à gauche. —
B. Grès. — C. « Cendre », formation ligniteuse. — D. Sable roux. — E. Sable gris jaune. — F. Poche de sable sale. — G. Grès, au fond de la poche. — H. Sable jaune roux. — I. Sable jaune clair. — J. Sable roux. — K. Sable roux sur lit de gros sable et de fin gravier ; *Quaternaire*. — L. Sable clair. — M. Magma de coquilles : M'. Sable roux autour de cendre. — N. Sable roux sur lit de gros sable et de fin gravier ; *Quaternaire*. — O. Bloc à *Nummulites laevigatus* ; élément *quaternaire*. — P. Glaise grise. — Q. Sable roux sous cendre. — R. Sable à coquilles brisées, la couche épaisse de 3 m. supporte des graviers quaternaires. — Z. Éboulis récents masquant la coupe.

une coulée de sable postérieure au grand glissement. Ce pourrait être lors de ce glissement de sable, que la nappe se serait rompue donnant le fossé transversal visible sur la coupe (et que l'on voyait aussi sur la coupe de l'autre versant de la tranchée, c'est-à-dire dans un plan parallèle distant de moins de 2 m).

Au point de vue géologique, cette coupe est pleine d'enseignements. Elle peut expliquer, en particulier, la présence de faune chaude et ancienne (*Hippopotamus amphibius*, *Rhinoceros Merckii*, *Elephas antiquus*) dans les très bas niveaux de Moru, à quelques kilomètres en aval, dans des sables montrant presque à chaque pas des traces évidentes de solifluction (poches), mais, toutefois, différemment situés par rapport à la pente. Elle interdit de tirer une conclusion quelconque des altitudes où des lambeaux de terrasse peuvent encore s'observer dans ces parages. Il suffit en effet de la formation d'un niveau d'eau à la surface des argiles pour provoquer des glissements de même nature. Quant à ceux-ci, bien que leur effet dépende des conditions climatiques, ils n'indiquent en aucune façon un phénomène lié au froid.

Cette belle coupe m'engage à reprendre l'étude que j'ai publiée sous le titre « Remarques sur la solifluction » dans les comptes rendus du 1^{er} Congrès international d'urbanisme souterrain (Le monde souterrain, 1937, p. 88-94).

Je n'étudierai pas ici les effets de la solifluction sur les éléments qui la subissent, mais leurs effets au point de vue de la stratigraphie et de l'allure des couches. Les actions de la solifluction sur les cailloux ont été étudiés par A. S. Barne et par M. Pei¹.

Le mot de solifluction² est un terme assez récent, il a été lancé en 1906 par Anderson. Ce n'est que plus récemment encore qu'il a désigné l'objet de nombreuses études³. Aujourd'hui le terme évoque classiquement des mouvements de terrain plus ou

1. PEI in *Rev. de Géogr. phys. et de Géol. dynam.*, 1936, p. 382. Alfred S. BARNES. De la manière dont la nature imite le travail humain dans l'éclatement du silex. *Bull. Soc. préhistorique française*, 1939, p. 79 sq.

2. Le mot vient de « fluctio » écoulement. Beaucoup d'auteurs écrivent « solifluxion » ; « fluxio », qui dérive également de « fluo », signifie de même écoulement. Pline employait « fluctio » pour « fluxio » ; je préfère l'orthographe dérivée de « fluctio » ; l'autre peut faire croire à une déformation par bombement comme dans une fluxion. L'orthographe de solifluction me semble évoquer plus clairement le fait que l'on veut désigner.

3. Parmi les géologues français qui se sont le plus activement occupés de la solifluction, il faut citer Louis Gentil, MM. Bigot et Milon et surtout M. l'abbé Breuil. Parmi les travaux sur les sols se déformant actuellement en pays froids, il faut citer ceux de Gripp à la suite de son exploration de 1927 au Spitzberg, en France ceux d'Aubert de la Rue sur les Kerguelen.

moins étendus, où une partie supérieure plus ou moins fluide se meut ou se déforme au-dessus d'un sol gelé en profondeur, le *Tjäle* des Suédois ; la véritable solifluction suppose ce substratum gelé ; et pour cette raison, la solifluction est décrite parmi les phénomènes de *nivation*. Nous étudierons les causes et les effets de la solifluction et nous serons amenés ainsi à conclure qu'il s'agit d'un phénomène complexe et pratiquement inséparable d'autres. Nous chercherons à voir jusqu'à quel point un terrain soliflué peut être considéré comme l'indice d'un ancien état climatique assimilable à la nivation.

Les phénomènes dont nous nous occuperons sont, au fond, connus par leurs effets depuis longtemps : Lyell en particulier a donné plusieurs coupes de terrains quaternaires avec couches contournées et où la solifluction (*s. lat.*) doit être invoquée.

Je ne parlerai pas du *Contorted drift*¹, classique depuis longtemps ; ses plis sont dus, en effet, à une action très particulière du glacier ; théoriquement ils sont pourtant dus à une solifluction car il n'y a aucune raison de ne pas considérer la glace comme une roche constituant un terrain de nature particulière ; mais le contorted drift répond à un cas tellement particulier et bien défini qu'il vaut mieux lui laisser son autonomie².

En France, des coupes où l'on peut voir des contournements et plissements, avaient été publiées par divers auteurs ; je citerai, au hasard, des coupes de Chelles, de Saint-Acheul par Boule³, d'Abbeville par d'Ault du Mesnil (1896), une coupe de Champigny-sur-Seine, avec limon sableux à ondulations, donnée par Laville⁴, une coupe de Cergy, du même auteur, avec contournement de la limite des sables alluviaux et des graviers supérieurs, une coupe d'Arques⁵ avec lits ondulés de sable au sein d'une couche de sable et argile. Comment avait aussi figuré, dans la Somme, des couches de presle (craie en miettes) en particulier, celles-ci formées de lits très contournés reposant sur des alluvions fluviales ; il avait eu le mérite⁶ d'entrevoir le rôle du dégel dans les glissements de ces terrains ; Boule d'ailleurs, en 1892, avait bien compris quelle ampleur le transport des « ter-

1. Pour expliquer certaines complications, on a parfois imaginé des causes tout à fait étrangères à la solifluction ; c'est ainsi que nous voyons invoquer une agglutination du gravier ayant permis à une saillie de 1 m 50 de gravier de subsister dans le sable superposé (Coupe à Saint-Acheul, cf. LYELL. *Ancienneté de l'Homme*, 3^e éd., 1891, p. 145, 147, fig. 23, DE MERCEY. *B. S. G. F.*, 1880, p. 8, fig. 3).

2. Il s'est produit, remarquons-le, hors des régions de nivation.

3. Essai de paléontologie stratigraphique de l'Homme, 1889, p. 88.

4. *Feuille des jeunes Naturalistes*, 1910.

5. PONTIER in *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 1914, p. 41.

6. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 1909.

rains névéens » (terme de Lecoq, 1867) pouvait avoir atteint dans le Velay. Mais en général, les auteurs n'avaient pas cherché à interpréter, au moins en ce sens, les coupes où ils rencontraient des contournements.

Le géologue belge Rutot invoquait en 1910 les glissements sur pente et l'effet du dégel (avec influence de la fonte des neiges et du sous-sol gelé) pour rendre compte des contournements des couches supérieures de Bologoïe, à mi-chemin entre Moscou et Saint-Pétersbourg ; il les comparait à ceux qu'il avait observés en Belgique et dans le Sud de l'Angleterre « le phénomène du contournement des couches superficielles se produit à la fin de l'hiver lors du dégel, etc...¹ ». C'est encore aux accumulations de neige et aux plissements dans le sens de la pente que cet auteur attribue les vagues figées, les petites colonnes que dessinent les lits de cailloux à la base de certains limons belges².

En Bretagne, de nombreux exemples de terrains soliflués au Quaternaire ont été décrits par MM. Berthois, Dangeard, Milon³ ; il y a eu des coulées boueuses et pierreuses que l'association avec des sols polygonaux permet de rapporter à de la nivation. Wernert⁴ a également fait d'intéressantes observations dans la vallée du Rhin ; il y a relevé des nappes solifluées de loess correspondant à 3 ou 4 époques différentes.

Deux phénomènes actuels peuvent produire des effets comparables à la solifluction et celle-ci peut être considérée parfois comme l'exagération de l'un deux ; elle se place entre eux et les relie ; il s'agit d'une part des glissements du sol, d'autre part des laves torrentielles. J'admettrai qu'il existe la série décroissante suivante : Alluvionnement normal-lave-solifluction-reptation.

Les glissements du sol se produisent en tous pays, et n'exigent nullement la nivation ; on les constate en certains points en terrains meubles ou ameublis par l'altération sur des pentes de 30° à 5° et certainement moins ; ces glissements revêtent parfois des aspects spéciaux : loupes de glissement des marnes du Lias de Bourgogne, du Flysch, rideaux. On sait qu'il peut même y avoir inflexion des têtes de bancs sur des pentes de 4°-5°⁵.

Ces glissements ne peuvent qu'être facilités par la neige.

1. Congr. préh. France, 1910, p. 228.

2. *Ibid.*, 1912, p. 467.

3. *CR. Ac. Sc.*, 9 juillet 1928, *C. R. somm. S. Géol. France*, 1930, p. 217.

4. *Bull. Soc. préhistorique française*, 1936, p. 623.

5. FOURMARIER. Observations sur le cheminement des dépôts superficiels. *Ann. Soc. Géol. de Belgique. Bull.*, t. XLIV, p. B.170.

Gignoux considère que la solifluction n'est qu'une exagération de cette *reptation* des sols et je suis tout à fait de cet avis ¹.

D'autre part on a décrit dans les régions torrentielles, les courants de matières ou transports en masse ; il se produit une *lave torrentielle* (= *Mure* des Allemands) quand le liquide de plus en plus chargé de boue acquiert un véritable état pâteux ; la vitesse diminue mais la puissance d'entraînement augmente considérablement, des blocs énormes sont emportés et le tout se dépose en bloc sans triage ; le dépôt simule un dépôt morainique à tel point que des confusions sont possibles ². Costa de Bastelica a bien analysé ces faits ³, il a décrit, en particulier, les contournements de couches observables dans les boues argileuses au sein de ces formations torrentielles desséchées.

Pour toutes ces raisons, on comprend que plusieurs auteurs ne considèrent pas la solifluction comme caractéristique des époques glaciaires ; c'est ce que Vaufrey remarque après W. Wolff pour les formations contournées dont les plus typiques se faisaient dans l'Holocène, c'est-à-dire le post-glaciaire ⁴ ; n'oublions pas, à ce sujet, qu'un grand froid et un dégel boueux ne sont pas rares en des pays tempérés comme l'Europe moyenne actuelle et ne sont pas sans favoriser la solifluction. Les glissements sont encore moins caractéristiques quand ils affectent des alluvions ; celles-ci parfaitement saturées d'eau peuvent, avant d'être tassées, glisser très facilement. Il y a déjà longtemps qu'Arnold Heim a décrit dans les marnes miocènes d'Oeningen, des plis en miniature (15 mm à 30 mm d'un synclinal à l'autre), ne pouvant provenir que d'un glissement sous-lacustre ⁵ ; Heim pensait que, en raison de leur localisation extrême, les replis compliqués du Wildflysch (Lutétien) et du Crétacé supérieur de la région de Habkern représentaient des glissements sous-marins ; il pensait

1. Entre reptation des sols et solifluction au sens ordinaire, il n'y a au fond qu'une différence de vitesse ; mais ceci peut avoir de très grosses conséquences ; si l'on pose un bâton de cire à cacheter sur deux supports, il s'infléchit si on laisse à la pesanteur le temps d'agir ; si l'on veut obtenir une déformation plus rapide, on brise le bâton. C'est à de telles différences qu'il faut certainement attribuer la différence d'allure de certains plis ou localisation de certaines brèches tectoniques. Comme nous le voyons ailleurs, H. Lasne avait bien compris le rôle de la lenteur dans certains cas de solifluction.

En général, il y a aussi cette différence que, dans la vraie solifluction des pays de nivation, le tjaïle forme à la base du terrain mouvant, une « limite nette ».

2. De même, dans les anciens pays de nivation, les coulées de pierre peuvent prêter à confusion avec des moraines. C'est ce qui s'est produit en Pologne, etc. (DE MARTONNE. *Traité de Géographie physique*, 1926, p. 862).

3. *Les Torrents*, 1874.

4. *L'Anthropologie*, 1936, p. 102 et 1931, p. 524.

5. Cf. COLLET. *Les Lacs*, 1925, p. 193, fig. 44.

aussi que certaines lacunes stratigraphiques et certaines répétitions pouvaient s'expliquer de même. C'est une explication que beaucoup de géologues perdent trop de vue ; pourtant Haug, dans son cours, nous enseignait que des brèches et conglomérats considérés comme fluviatiles ou continentaux pouvaient se trouver aussi en mer dans les zones néritiques et bathyales à la suite de glissements sur la pente ¹.

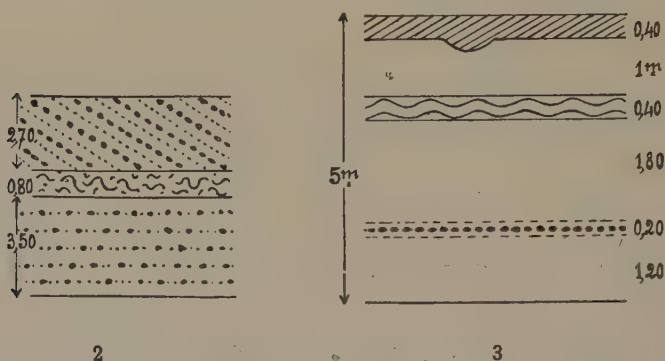


FIG. 2. — Coupe des graviers quaternaires, à 1.200 m au NNE de l'église de Saint-Georges-les-Baillargeaux (Vienne) ; vallée du Clain.

2 m 70 : graviers très inclinés.

0 m 80 : partie centrale d'une longue lentille de limon contourné.

3 m 50 : graviers.

FIG. 3. — Coupe dans le Quaternaire de Clan (Vienne) à 1 km au SE de Payre, parallèlement à la route :

0 m 40 : Terre végétale.

1 m : Débris, parfois très fins, de calcaire.

0 m 40 : Terre grasse humide, avec tendance au contournement.

1 m 80 : Sable avec petits cailloux (d'autant plus représentés par des calcaires qu'ils sont plus hauts).

0 m 20 : Zone plus riche en silex.

1 m 20 : Sables et cailloux à *Cervus tarandus*.

1. Ce sont peut-être des glissements de fond qui ont causé certains amas de galets au sein de sables marins comme j'en ai signalé dans les sables auversiens de Villevert près Senlis (Cf. *B. S. G. F.*, 1931, p. 316). Ils peuvent expliquer certaines variations d'épaisseur des sédiments, par exemple, de l'argile plastique épaisse dans les synclinaux, réduite sur les anticlinaux (cf. LEMOINE. *Géologie du Bassin de Paris*, 1911, p. 217). On oublie trop que la sédimentation ne s'est pas toujours opérée sur un fond plat. C'est par de tels processus que M. Cayeux explique certaines particularités des silex de la craie.

Récemment, M. Jean Goguel a décrit des glissements sous-marins avec plisotements dans le Crétacé inférieur de Valflaunès (Hérault) et donné, à ce propos, des références de comparaison (*B. S. G. F.*, 1938, p. 251 sq.). D'autre part, M. Moshé Avnimelech a observé, dans le Crétacé à silex de Palestine, des zones bréchoïdes, comprises entre des couchés inférieures et supérieures non bréchoïdes et à stratification absolument calmes et régulières. (GIGNOUX et M. AVNIMELECH. *B. S. G. F.*, 1937, p. 28). Mais il ne faudrait pas, dans certaines apparences semblables, oublier les effets des plis dysharmoniques et commettre des confusions.

Ces accidents trop oubliés, mais admis, affectent évidemment les alluvions fluviales. Dalloni ¹ a figuré des sables et graviers fluviaux affectés de contournements, dans la vallée de la Dordogne ; on pourrait ici penser à un effet de solifluction postérieur.

Personnellement j'ai été frappé par une observation dans les sables fluviaux quaternaires dans la banlieue de Bucarest (carrière Suter, terrasse de 13 m) près du Lac de Fundeni ; il s'agissait de sable avec contournements en miniature à l'intérieur d'une lentille non contournée, le contournement et le glissement étaient donc, de toute évidence, contemporain du dépôt des alluvions. Les coupes ci-contre de *Dissais* et de *Clan* montrent des couches fluviales présentant des accidents assez comparables (fig. 2 et 3).

Cet exemple doit être bien compris et sa portée doit être exactement appréciée ; les alluvions de sable et gravier avec stratification lenticulaire et entrecroisée typique ne sont qu'exceptionnellement contournées (par une solifluction qu'il faut tenir comme nettement postérieure). Le contournement contemporain de la sédimentation paraît ne se produire que lorsque le sable humide n'est pas tassé (dans le cas cité, avant le dépôt de la lentille suivante, — une fois tassé, le sable ne se prête plus à la solifluction) ; ce contournement dans le détail n'est donc invoqué que pour illustrer, à une échelle beaucoup plus petite, les possibilités de transport en masse des sables et graviers fluviaux.

En étudiant les alluvions quaternaires, on remarque souvent, à la base ou interstratifiées ², souvent encore superposées, des masses de graviers et cailloux n'ayant pas l'aspect stratifié des alluvions ordinaires, n'ayant pas, en particulier, leur aspect lenticulaire avec stratification inclinée et entrecroisée. J'ai publié ³ une coupe relevée à Champagne (vallée de l'Oise), très significative à cet égard ; j'ai écrit que ce blocage de cailloux non stratifiés n'avait certainement pas une origine alluviale, que c'était un produit de solifluction n'ayant pu se produire que grâce à la nivation. Je suis devenu beaucoup moins catégorique. Le transport des matériaux peut se faire d'une façon différente ; il peut s'agir d'une masse pâteuse rampant sur le fond comme une lave torrentielle ; mais une telle masse ne se dépose pas toujours en une fois ; on voit en effet quelques lentilles peu épaisses

1. *Congrès Ass. fr. Av. Sc.*, 1908, fig. 1, p. 680.

2. Il peut y avoir plusieurs intercalations ; cf. BREUIL, 1934, fig. 42, 23 et surtout 12. Je me refuse, jusqu'à ce qu'une preuve formelle en soit donnée, à voir dans les 3 laves étagées, l'effet de 3 glaciations successives.

3. *B. S. G. F.*, 1931, p. 330, fig. 5. Cf. également 1924, p. 489.

en général, parfois assez étendues, de sable plus ou moins gras, interstratifiés. Ces lentilles peuvent être très plissées comme je l'ai décrit à Précy¹, mais ces contournements sont postérieurs et manquent le plus souvent. Ces lentilles² indiquent que l'accumulation ne s'est pas faite en une fois ; il reste à savoir si le glissement qui a parfois plissé ces lentilles est dû à une solifluction postérieure immédiatement ou non. D'ailleurs, à Champagne même, le blocage présente au moins sur de grandes étendues une disposition en lits horizontaux ; il s'agit donc autant d'un alluvionnement rapide et grossier, sans triage, que d'un vrai transport en masse (fig. 4).

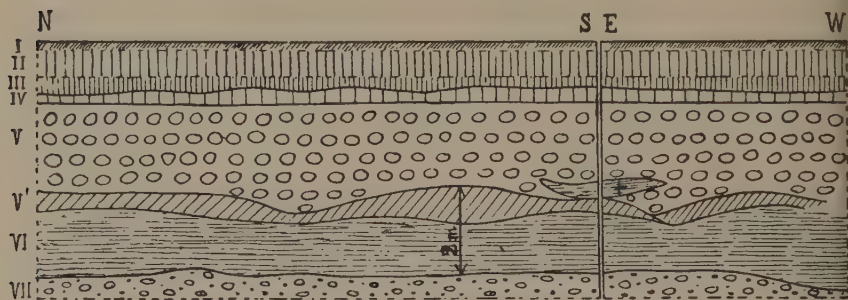


FIG. 4. — Champagne (Seine-et-Oise). Coupes perpendiculaires l'une à l'autre, se raccordant en SE.

I. Terre végétale. — II. Limon de lavage couleur de loess clair. — III. Limon de lavage roux et fendillé (été très sec). — IV. Loess. — V. Blocage de cailloux à lits horizontaux, avec (V') Cailloux et graviers alluviaux, à la base (l'épaisseur de V' est de 0 m 35 au maximum et a été exagérée sur le dessin).

VI. Sables gras et maigres, en bancs alternants, épais chacun de 0 m 05 à 0 m 20, formant une couche continue ainsi qu'une lentille en +. — VII. Alluvion caillouteuse.

Lorsqu'on examine de près le dispositif des éléments constituant un lit de cailloux au sein d'une masse d'alluvions à structure lenticulaire, on remarque qu'ils sont aussi peu triés que dans les couches de lave (coombe-rock) ; autrement dit, à l'intérieur de ce lit grossier, il n'y a aucune trace de disposition litée. N'y aurait-il donc qu'une différence d'épaisseur entre ces lits d'alluvions vraies et les coombe-rocks ? Il n'y aurait pas lieu, dans ce cas, de leur attribuer des origines différentes. En réalité, deux autres remarques s'imposent à l'observateur ; dans la lave, d'une part, les cailloux atteignent souvent de bien plus

1. *Ibid.*, fig. 6.

2. « Rafts » ; cf. BRÉUIL, *Rev. de Géogr. phys. et de Géol. dyn.*, 1934, fig. 22, 46. Ce terme de Raft a été employé précédemment par Lyell (*Principes...* 1873) pour désigner toute autre chose à savoir des accumulations d'arbres flottants arrêtés par des obstacles.

grandes dimensions que dans l'alluvion vraie ; d'autre part, sables et cailloux sont sales, gras, limoneux ; au contraire, le sable des lentilles alluviales est propre, sec en général. Ainsi donc, le sable alluvial apparaît comme déposé et lavé par une eau relativement limpide ou s'étant comportée comme telle dans la sédimentation, animée d'une vitesse suffisante pour ne pas déposer de limon ; au contraire la lave apparaît comme une boue s'étant arrêtée tout d'une pièce (une eau abandonnant son limon n'aurait jamais pu transporter les blocs que l'on rencontre dans ces alluvions). Il y a parfois intercalation d'un faciès dans l'autre ; on trouve dans la lave, des lentilles de sable plus maigre et même de vrai sable alluvial ; c'est que, momentanément, et localement, la vitesse de l'eau convenait à leur alluvionnement, peut-être par simple remaniement local de la lave sous-jacente entre deux dépôts consécutifs de cette lave. Ces lentilles sont de véritables éléments alluviaux où peuvent se rencontrer des Mollusques dulçaquicoles (Gastropodes et Lamellibranches, à Précy-sur-Oise).

Dans les conditions classiques, le transport des matériaux se fait dans une eau plus claire et ils se déposent lorsque, passant sur un fond, l'eau se ralentit ; la sédimentation s'effectue comme lorsqu'une rivière aboutit dans un lac ; les couches sont donc inclinées comme dans un delta et, comme le sens du courant change dans le détail continuellement, les remplissages des différents fonds forment chacun une lentille et présentent le dispositif bien connu de la stratification entrecroisée.

Pourquoi les couches de cailloux formant blocage se voient-elles souvent au sommet ? Ceci peut tenir à ce que si un tel dépôt se produit sous une épaisseur d'eau suffisante, il peut être repris, ses matériaux étant étalés plus loin et se déposant après un triage relatif ? Les dernières couches, au contraire, ne peuvent plus être remaniées, l'épaisseur d'eau étant devenue moindre par suite du comblement. Mais on peut également invoquer un gel en profondeur. Notons que la présence de gros matériaux est normale à la base ; ainsi l'existence d'un tel blocage peut plus facilement ne pas y être remarqué.

La comparaison avec les deltas torrentiels peut être poursuivie ici ; au-dessus des couches inclinées de sable et gravier alternés, on y trouve en effet des cailloux. « Quant aux plus gros galets, écrit Albert de Lapparent ¹, il est à remarquer qu'à partir du moment où le cône immergé a commencé à se consti-

1. Traité de géologie 1906, p. 213. Une belle coupe montrant cette superposition dans un delta lacustre se voit dans COLLET. Les Lacs, pl. XXIV.

tuer avec sa pente normale, ils ne peuvent plus se déposer qu'à la surface ; car c'est là que le premier ralentissement de la vitesse a lieu et que le courant devient insuffisant pour remuer de gros matériaux. De cette manière, à mesure que le cône de déjection se prolonge et s'étale vers le lac, sa surface tend à se couvrir de cailloux roulés. . . » Il s'agit évidemment ici, dans cette description, d'un dépôt de galets normalement déposés ; mais dans bien des cas il doit s'agir d'une véritable lave de fond. Il y a, d'autre part, différents degrés de viscosité des laves et tous les passages des plus pâteuses d'entre celles-ci aux vraies alluvions fluviales. Que cette comparaison ne nous fasse pas non plus oublier la présence très fréquente de tels amas à la base des alluvions ou dans leur masse.

Le transport en masse peut expliquer la présence de blocs parfois immenses, isolés d'une façon incompréhensible au sein d'alluvions de calibre normal. Ils ont pu être amenés à leur place, entraînés au sein de la lave pâteuse ; ensuite les éléments de poids normal auraient été repris et remplacés par d'autres présentant la stratification alluviale normale. On peut comprendre ainsi le transport non seulement de blocs consistants mais encore de tronçons de couches d'argile plastique comme j'en ai noté dans l'Aisne.

John Evans ¹, a donné un exemple montrant les possibilités de transport par un petit ruisseau des Monts Cheviots ; celui-ci, grossi par une forte pluie, avait transporté dans une plaine voisine plusieurs milliers de tonnes de sable et gravier ; il avait en outre charrié à 3 km des blocs de plus d'une demi-tonne et à 300 m un bloc de près de 2 tonnes.

Le lit de ce petit ruisseau était certainement parcouru par une vraie lave. Les transports par la lave des torrents sont, d'autre part, classiques. Ces possibilités intéressent le géologue au plus haut point ; en effet divers auteurs ² ont depuis longtemps attiré l'attention sur la présence de gros blocs de roche souvent étrangère à la région, dans les alluvions quaternaires ; ces blocs sont enveloppés par des alluvions sableuses parfois très fines et bien stratifiées. Pour expliquer ces faits, Lyell ³, Douvillé ⁴, J. de Mor-

1. Les Ages de la Pierre, 1878, p. 645, d'après Lyell. Principles of Geol., 10^e éd., p. 350.

2. Par exemple CHAPUT. Thèse, 1924, p. 116-117 citant G. de MORTILLET, 1866, STANISLAS MEUNIER (*Géol. des env. de Paris*, 1875, p. 441) fournit des exemples importants dans la région parisienne.

3. LYELL. Ancienneté de l'Homme, 1891, p. 147-154.

4. DOUVILLÉ. *CR. Ac. Sc.*, 10 oct. 1910.

gan¹ en particulier, ont recouru à l'hypothèse du transport par des glaçons.

J'ai, avec d'autres², envisagé le transport de gros blocs ensermés par les racines d'arbres, mais j'ai considéré que cela paraissait une explication moins générale.

La solifluction fournit donc une troisième explication peut-être aussi générale que celle par les glaçons; il paraît toutefois difficile de concevoir une lave amenant des granites du Morvan jusqu'à Paris.

Production, Facteurs internes et hydrologiques. — La constitution du matériel soliflué joue un rôle aussi important que la pente.

Un mouvement d'ensemble d'une masse meuble n'est possible que s'il existe un certain vide permettant aux grains de se mouvoir les uns par rapport aux autres; le vide correspondant à la limite peut être caractérisé par la « densité critique » ou densité apparente; cet état d'équilibre critique paraît dépendre de la forme des grains.

Ceci peut expliquer que parfois un terme peut se mouvoir sans que le terme concordant le suive.

La complexité de ces phénomènes est très grande, je citerai seulement un travail récent³: « Si le pourcentage de vide initial est supérieur au pourcentage critique, le sable se tasse pendant le mouvement, et, s'il est saturé, il y a expulsion de l'eau en excès. » La vitesse de cette expulsion dépend du grain. « Au début du tassement, le sable se comporte donc comme un liquide et les grains flottent presque librement dans l'eau. Il en résulte qu'à cet instant, la résistance au cisaillement n'est plus qu'une faible fraction de la résistance au cisaillement initial. Nous désignerons ce phénomène sous le terme de *liquéfaction brusque* par tassement ou *fluence*. Il peut prendre naissance pour des causes négligeables en apparence telles que: variation du niveau de la nappe phréatique, battage de pieux⁴, explosions, faible déplacement du terrain recouvrant une couche de sable peu tassé

1. DE MORGAN. Préhistoire orientale, I, 1925, p. 130.

2. B. S. G. F., 1931, p. 351; cf. DARWIN. Origine des Espèces, 1896, p. 438, et CAYEUX. Roches siliceuses. Mém. Serv. Carte Géol. France, 1929.

3. RODIO, BERNATZIK et DAXELHOFER. Érosion interne et autres phénomènes singuliers affectant la stabilité des massifs pulvérulents saturés d'eau. Centre d'études et de recherches géotechniques, Paris, Bull. n° 5, 1937.

4. COLLET (Les Lacs, 1925, p. 194-195) cite des exemples de glissements récents en Suisse: à Montreux, à Zoug; ici c'est l'ébranlement du sol par les chocs (vibrations pour planter des pilotis) qui aurait rendu semi-fluide le limon argilo-sableux.

(par exemple, par gonflement d'une couche d'argile coupée par une tranchée), etc... »

Une expérience simple montre la sensibilité des ces phénomènes. Un poids étant posé sur du sable, très peu tassé et saturé d'eau, on enfonce une petite tige dans le sable, ceci provoque la liquéfaction de la masse et le poids s'enfonce. Ainsi on devine comment, dans la nature, de multiples causes peuvent provoquer des ruptures d'équilibre et des écoulements en masse : modification de niveau hydrostatique, surcharge, érosion superficielle, percement d'une couche imperméable. On devine, en particulier, les graves conséquences que peut avoir le changement du niveau de base présidant à la transformation d'une plaine d'inondation en terrasse ou encore l'accumulation de sédiments éoliens (loess) ; il y a dans les deux cas modification du niveau hydrostatique et, dans chaque cas, des modifications particulières faciles à déduire ¹.

On devine que le calibre et la forme des grains du sédiment importent beaucoup ; la rondeur des grains favorise la liquéfaction par tassement ; et leur finesse, le maintien de l'état fluent (*ibid.*, p. 6). Par contre, lorsque le grain est très fin (boues) les actions de surface ne sont plus négligeables, la masse possède ainsi une certaine cohésion empêchant la liquéfaction. On sait également l'influence du calibre des grains sur la perméabilité et la répartition souterraine de l'eau.

On conçoit donc qu'une couche sédimentaire puisse se déformer et se déplacer alors que les couches concordantes restent pratiquement indemnes.

Parmi les causes de déformation, de glissement aussi bien que de tassement, il y a également l'altération par dissolution. On peut voir des contournements de solifluction en miniature dans certaines poches en provenant. H. Lasne ² en a décrit à propos des poches de phosphates dans la craie blanche aux environs de Doullens ; il les a comparés aux figures obtenues par Tresca

1. A propos de l'assèchement du sol dans une ville comme Berlin, M. A. AGATZ remarque (1^{er} Congrès international d'Urbanisme souterrain, Paris, 1937, Rapport n° 10) que l'assèchement provoque un surcroît de charge sur les couches inférieures, d'où, si les couches sont argileuses, un tassement. Ainsi M. D. G. POLCHINE (*ibid.*, Rapport n° 12) signale qu'un pompage peut provoquer un affaissement de bâtiments à des distances très considérables du point de pompage. Enfin M. E. C. W. A. GEUZE (*ibid.*, Rapport n° 13) souligne que le rabattement de la nappe augmente la densité apparente du sol par suppression de la poussée hydrostatique.

Toute variation naturelle de l'humidité ou du drainage modifiant le niveau hydrostatique peut évidemment provoquer des résultats analogues.

2. B. S. G. F., 1894, p. 350, fig.

dans ses expériences sur l'écoulement des solides; il y a vu l'effet de la plasticité des sables et argiles, favorisée par l'humidité et la grande lenteur des mouvements. Non seulement il y a production de vides visibles mais il y a aussi une modification de l'agencement des grains entre eux.

Dans le phénomène dit « Érosion interne » par les ingénieurs (Rodio, etc..., *loc. cit.*, p. 7, 12) il se produit un véritable écoulement et un alluvionnement souterrain de sable pouvant aboutir à des effondrements éloignés du point initial d'écoulement. Terzaghi ¹ rapporte un exemple qui s'est produit récemment dans un coteau morainique; une érosion interne dans les sables fins sous-jacents à des graviers, sables gras et argile agglomérés se produisit à la suite d'un pompage prolongé dans une fosse et entraîna un affaissement en entonnoir à 100 m de là. Ceci pourrait se produire au bord d'une terrasse par modification de l'équilibre des eaux souterraines. Notons avec Terzaghi que l'écoulement de sable semble, chose logique, suivre de préférence le contact du sable et des roches différentes (argile, etc...); celles-ci se comportent comme un toit protecteur ².

Si une partie du sable noyé peut s'échapper, il se produit souterrainement une érosion et une sédimentation dont l'importance relative et l'extension dépendent de la pente de la nappe et de l'inclinaison du talus du sable noyé dans la cavité de base; si ce talus est plus proche de l'horizontale que la pente de la nappe, la propagation peut théoriquement ne pas s'arrêter (même si l'échappement s'arrêtait au niveau de la cavité de base).

Ici encore, nous voyons les variations du niveau hydrostatique jouer un grand rôle dans les ruptures d'équilibre (niveau et pente du toit protecteur, circulation, pente de la nappe).

Ces phénomènes se distinguent de la solifluction parce qu'ils s'étendent plutôt linéairement qu'en nappe et qu'ils s'effectuent en profondeur; toutefois ils font admettre la possibilité de vraies solifluctions souterraines. Ils peuvent expliquer la superposition d'un matériel soliflué à une base intacte (cf. *ibid.*, fig. 9).

Il faut bien souligner que ces produits de l'érosion interne ou d'autres actions d'un courant d'eau souterrain sont à distinguer de la solifluction vraie.

Ces phénomènes qui nous permettent d'expliquer bien des faits sans recourir à la nivation, etc..., nous aident aussi à

1. TERZAGHI. *Ingenieurgeologie*, p. 435.

2. Si le niveau hydrostatique est dans la masse même du sable, il existe au-dessus de la nappe une zone de sable humide rendue cohérente par les forces capillaires et jouant un peu le rôle du toit protecteur précédent.

comprendre que les grands froids facilitent les glissements ; en particulier, la gelée provoque une variation de volume de l'eau, modifie le vide entre les grains et peut ainsi aider la solifluction.

L'action amplificatrice du froid n'est pas due seulement à l'augmentation du volume de l'eau lors de la gelée ; comme Mac Cool et Bouyoucos l'ont remarqué pour expliquer le soulèvement du sol par la gelée, il y a un véritable nourrissage des cristaux de glace par appel de l'eau restée liquide en profondeur ¹.

Gignoux et M. Avnimelech ² ont récemment rappelé les expériences de Taber, avec formation de brèche ; des soulèvements de routes ont été observés sur un sous-sol argileux et humide par suite de l'appel d'eau par congélation.

F. Munichsdorfer ³ remarque que, sous l'influence du froid, les différentes couches voisines de la surface se dilatent, plus ou moins suivant leur tassement, leur nature minéralogique argileuse et leur teneur en eau, fonction elle-même de la congélation. Dans le Nord de la Suède, des sols atteints par la congélation sur un mètre d'épaisseur peuvent foisonner d'un demi-mètre. Les pierres incluses dans le sol sont amenées plus près de la surface.

Influences mécaniques. — Les mineurs anglais ont décrit sous le nom de *creeps* ⁴ des déformations avec bombement du plancher de la mine lorsque celui-ci est moins résistant que le toit, ce bombement très lent qui peut aller jusqu'au remplissage de la galerie, entraîne une déformation et un glissement des couches montrant que certaines solifluctions peuvent être dues aux seules pressions inégalement réparties.

A ce phénomène dû à la seule pression il faut ajouter les exemples de couches déformées et rompues par la pression d'un édifice, d'une simple digue par exemple ⁵. Nous retiendrons qu'une inégale répartition des pressions peut provoquer de très notables déformations avec échappements latéraux.

Dans les Pays-Bas, il y a des affaissements de la tourbe au-dessous du niveau marin, causés par l'échappement latéral et le tassement du sable sous-jacent ⁶.

1. Causes and effects of soil heaving. *Michigan Agric. Exp. Station. Spec., Bull.*, 1929.

2. *B. S. G. F.*, 1937, p. 29-30.

3. Die Mechanik des Bodenfrostes. *Ernaehr. der Pflanze* ; Bd. XXXI, Heft 4, Berlin, 1935, p. 61 sq. (avec bibliographie).

4. LYELL. *Éléments de Géologie*. Trad. franç., 6^e éd., 1864, p. 84 ; j'ignore pourquoi Suess a considéré ce terme comme désignant des failles inverses.

5. Cf. par exemple WASMUND : in *Geologie und Bauwesen*, 1937, fig. 8 ; et in *Archiv. für Hydrobiologie*, 1933, fig. 4.

6. SUSS. *La Face de la Terre*, II, p. 677.

Influences topographiques. — Le glissement étant facilité par la pente, il est inutile d'insister sur le rôle des influences topographiques ; pourtant il n'est pas inutile de rappeler que la transformation d'une plaine alluviale en terrasse par suite de la modification du profil de la rivière peut être très efficace ; il faut remarquer que lorsqu'un cours d'eau abandonne soit un lit majeur, soit à la fois celui-ci et son lit mineur, il ne laisse pas une plaine parfaite mais un terrain inégal ; les saillies doivent tendre à s'écouler vers les creux ; on peut ainsi expliquer très simplement les phénomènes de solifluction observés souvent au milieu d'une grande plaine d'alluvions comme dans l'exemple, figuré ci-contre, de Bonneuil-sur-Marne (fig. 5).

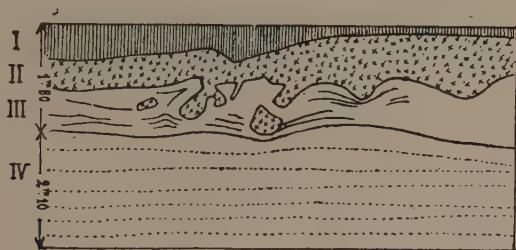


FIG. 5. — Ballastière dans l'angle sud-ouest formé par le chemin de fer, et la route de Bonneuil à Valenton : coupe perpendiculaire à la route (cote + 37 ; Seine à + 29,2 ; plaine inondable vers + 35). Solifluction intéressante parce qu'affectant les alluvions de bas niveau et parce qu'en vraie plaine.

I. Terre végétale. — II. Cailloutis et poches de cailloux. — III. Limon gris stratifié. — Gravier fluviatiles.

Formations. — Parmi les formations solifluées se place le *Head* ; ce terme, employé par Prestwich, a été repris par Berthois et Dangeard¹ ; il désigne des blocs anguleux de roches locales plus ou moins descendus sur les pentes et noyés dans une gangue d'éléments fins ; c'est donc un dépôt de pente (Le terme de *rubble drift* est considéré comme synonyme). Bigot² a signalé un head postérieur au Moustérien et à la dernière faune froide quaternaire dans les îles anglo-normandes. Il y a également la *presle* des géologues du Nord de la France, formée de débris de craie ayant glissé sur celle-ci et ayant chevauché parfois les alluvions. La pente a grandement facilité son glissement. J'ai observé à Eragny une formation très comparable ayant enseveli les alluvions fluviatiles à *Elephas primigenius*³ ;

1. Bull. Soc. Géol. et Min. Bretagne, 1929, p. 45.

2. C. R. somm. S. G. F., 1935, p. 95.

3. Cf. PATTE. B. S. G. F., 1931, p. 328, et BREUIL, 1934 (*loc. cit.*), fig. 34.

ici le matériel venait non de la craie mais des caillasses à *Potamidés cristatus* du Lutétien supérieur. Ces matériaux, surtout à la base des pentes, peuvent avoir été repris et plus ou moins triés par les eaux de pluie ou d'inondation.

Dans la plaine poitevine et les régions voisines, j'ai souvent vu des dépôts de pente formés de menus graviers de calcaire éclaté¹ venant des dépôts jurassiques (Bajocien, Callovien, Lusitanien, Portlandien). Leur stratification est toujours fortement inclinée, correspondant à un talus d'éboulement ; j'ai observé à Bresdon (Charente-Inférieure) des couches en pli couché (fig. 6) ;

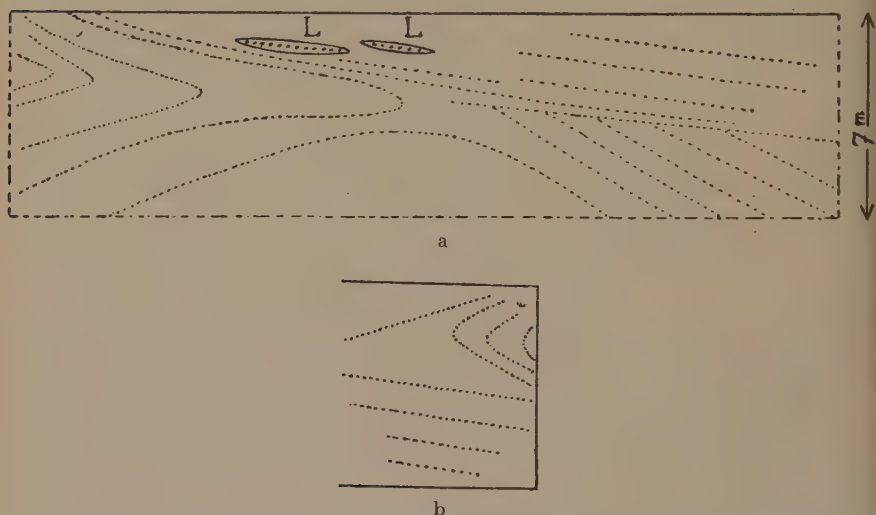


FIG. 6. — Coupe dans un vallon affluent du Brion, à 500 m au SSW du hameau de Breuil-Bâtard, commune de Bresdon, Charente-Inférieure : alluvions exploitées sur la pente sud-ouest ; allure des couches.

a) Coupe parallèle au thalweg ;

b) coupe normale. L, L = lentille formée par des morceaux de calcaire.

je ne peux que les attribuer à une solifluction facilitée par l'humidité ; ce sont des alluvions locales. Je me garde d'y voir l'effet de la nivation. On voit en même temps qu'il peut y avoir passage insensible d'éboulis à des masses solifluées. La coupe figurée des dépôts de pente près de Fontclaireau (Charente) montre un stade correspondant à une simple déformation en crochet au voisinage de la surface (fig. 7). Par contre, peu au Nord de Bresdon, à Villiers-sur-Chizé (Deux-Sèvres), j'ai noté dans des conditions analogues, une série de petits plis couchés

1. D'après les descriptions, ces dépôts sont identiques à la *grouine* de la Lorraine calcaire.

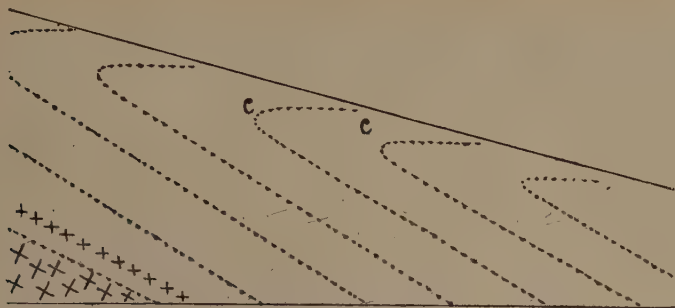


FIG. 7. — Coupe dans les éboulis calcaires, route de Fontclaireau à Bayers (Charente); croupe à l'W de Moulonneau.

Les couches inclinées de 30° sont formées d'éléments de plus en plus grossiers vers la base : près du sol, elles dessinent des crochets. Il y a 2 à 3 m entre les deux sommets marqués C de ces crochets.

de détail ; ils affectaient les couches composantes, non la masse.

Nous avons également les *laves* ou blocages dont nous avons parlé, c'est le synonyme à peu près exact du *Coombe rock* des Anglais.

Comme cas particulier du Head nous avons certains *limons* et certains sables. J'ai considéré comme de vastes coulées sableuses de solifluction, les lambeaux de sables à galets des environs de la Fère ¹ ; et les sables de Sissonne, formation de transport d'origine locale ², ont une origine vraisemblablement analogue ; pourtant il est très difficile, je crois même impossible, de dire si un sable a été étalé par ruissellement ou solifluction parce qu'il y a tous les degrés entre les deux types de transport et parce que, d'autre part, un sable soliflué est fatalement remanié par le ruissellement et que l'inverse est également fréquent.

Dubois ³, dans sa classification des limons, en a attribué une catégorie à la solifluction ; pour les mêmes raisons, il est très difficile de distinguer ceux-ci des limons de ruissellement ; il serait, d'autre part, bien téméraire de trouver dans un simple limon soliflué un indice de nivation. Remarquons que beaucoup de limons passent au head.

Le *trail* est un dépôt graveleux particulier qui s'est produit pendant la dernière période glaciaire, par solifluction, dans les vallées anglaises non atteintes par le glacier ; il est surmonté par les alluvions flandriennes.

1. B. S. G. F., 1931, p. 322.

2. Mém. S. G. F., 1937, p. 5.

3. Revue Scientifique, 11 juillet 1931.

Le *till* ou argile à blocs, le *contorted drift* n'ont pas à être définis ici car ils correspondent à une solifluction en vrai pays glaciaire.

L'influence de la solifluction dans la formation des limons ne doit pas être perdue de vue par les géologues et les préhistoriens ; on conçoit, en effet, la possibilité de répétition de termes ou d'intercalation mécanique de terrains étrangers. C'est ainsi que nous avons vu à Précy un lambeau de craie entre des sables et des limons ou loess ; ici il n'y a pas d'erreur d'interprétation possible ; mais dans d'autres cas, on pourrait prendre pour un cailloutis autochtone un cailloutis soliflué ; à la briqueterie d'Allonne (Oise), j'ai remarqué, au sein de limons et loess, vers leur base, un lit de cailloux venant d'alluvions anciennes plus élevées¹ ; ce ne peuvent être que des éléments soliflués. On voit combien l'interprétation de la stratigraphie de tels dépôts est délicate.

Effets sur le substratum. — Les masses en mouvement peuvent labourer littéralement leur support. La coupe ci-jointe, relevée à Sorbais sur le versant droit de l'Oise, à 500 mètres à l'Est de l'église, en est un exemple (fig. 8). On conçoit qu'à un degré plus avancé, un paquet de ce substratum puisse être arraché. Dans des conditions analogues, encore au pied d'un

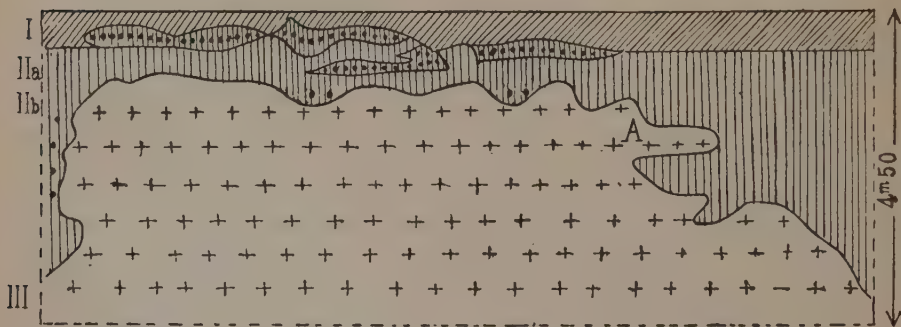


FIG. 8. — Coupe suivant une courbe de niveau dans la ballastière, à l'Est de Sorbais, rive droite de l'Oise.

I. Terre végétale. — II. a) Limon avec cailloux. — II. b) Limon ; les points ronds y indiquent des zones où il est chargé de cailloux. — III. Craie ; à droite de A : apophyse formée de craie solifluée en bouillie, avec quelques cailloux. Une coupe située parallèlement et au-dessus montrait le prolongement de cette saillie de craie.

1. A la briqueterie de Mantes-la-Ville (Seine-et-Oise), fait probablement semblable, les éléments grossiers étant fournis par l'argile à silex, normalement à la base mais pouvant, par répétition, se trouver un peu plus haut.

versant crayeux, j'ai noté, à la briqueterie entre Précy¹ et Blaincourt (Oise), un énorme paquet de craie, contourné, entre le sable thanétien lui-même probablement entraîné et le loess sableux ; ce paquet, droit dans l'ensemble, en moyenne d'un m d'épaisseur, avait plus de 5 m de long (peut-être le double) et présentait un contour déchiqueté aussi compliqué que certaines

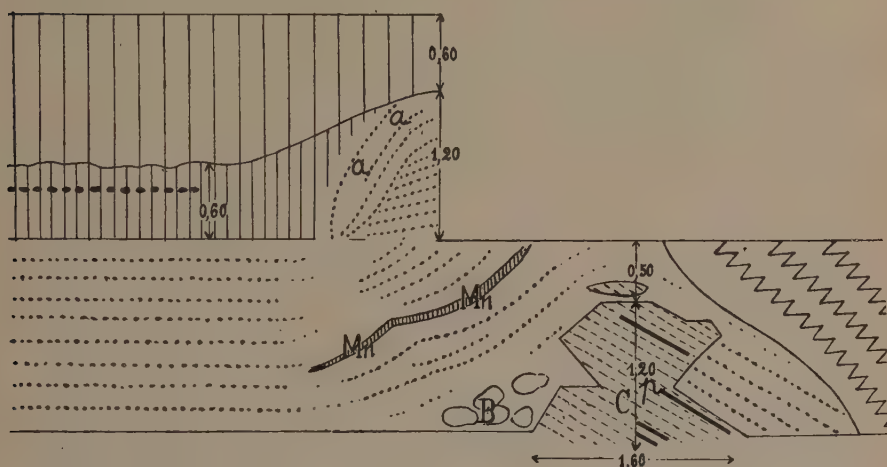


FIG. 9. — Alluvions quaternaires de la Charente à Cognac au Nord de la route de Crouin à Jarnouzeau, au N du Logis ; coupe ouest-est.

I. Terre végétale et limon sableux fendillé roux foncé.

II. Sable très limoneux, à aspect de loess, avec cailloutis.

III. Sables et graviers parfaitement horizontaux du côté ouest puis brusquement relevés. En a, les couches atteignent 60° et même 70° d'inclinaison.

Mn = Couche colorée par du bioxyde de manganèse, intéressante car elle montre que la déformation est postérieure à cette modification des alluvions déposées¹. A l'E de C, les couches sont inclinées en sens inverse.

B = Amas de blocs de calcaires blancs du Crétacé.

C = Saillie de Crétacé (marnes à Ostracées) avec en p, indication probable du pendage de ces couches déformées.

A l'Est, les éboulis (traits en zigzag) masquent la coupe ; sur la coupe perpendiculaire, les sections des couches a sont horizontales.

A quelques mètres plus au Nord et sur quelques dizaines de mètres, les marnes à Ostracées forment un substratum horizontal ne supportant qu'1 m 10 de sable et de limon.

1. L'inverse ne serait pas probant ; j'ai vu dans la même sablière (Quaternaire du Cimetière de Graves, Charente), les trainées manganésifères tantôt conformes au tracé des lentilles horizontales de sable tantôt très discordantes et formant des guirlandes en chaîne.

1. C'est plus bas au débouché de ce vallon dans la vallée de l'Oise que j'ai dessiné les coupes d'alluvions avec blocage de cailloux intercalé entre les sables fluviaux et le loess ou le limon loessique. Une véritable lave d'argile à silex a coulé ainsi du versant crétacé dans le fond du vallon, puis vers la rivière ; des boules de craie, piquetées par les chocs, indiquent la proche origine de cette masse. (Cf. B. S. G. F., 1931, p. 332).

sutures craniennes. Comme type très curieux de labourage, il faut mentionner la formation des poches que nous étudierons dans un instant ¹.

Déformations. — Au cours de leur cheminement, les couches solifluées se déforment et se plissent (fig. 10) ; il se produit par-

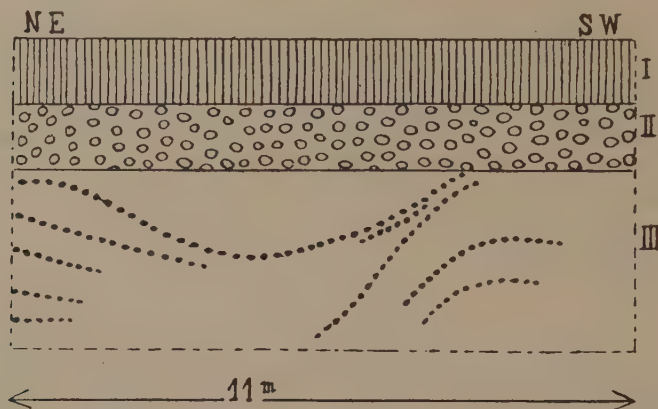


FIG. 10. — Plis de solifluction dans les graviers fluviaux de Précy-sur-Oise. (Comparables aux plis dysharmoniques de la géologie ordinaire).

I. « Loess ». — II. Blocage de cailloux. — III. Graviers. — La limite entre II et III est rectiligne. La coupe perpendiculaire rencontrerait les couches de graviers inclinées de 30° vers NW.

fois de véritables renversements ² comme j'en ai figuré quelques-uns ³ et comme dans l'exemple ci-contre de Bresdon.

A ces déformations, peuvent s'ajouter celles dues, soit, autant que ceux-ci sont bien réels ⁴, aux mouvements de convection dus à la gelée comme il s'en produirait dans les pays de nivation lors de la production des sols polygonaux et des sols rubanés, soit à des mouvements similaires ; il y a aussi l'effet de l'enfoncement de certains gros blocs, etc... Leur complexité varie avec la nature du terrain, son état hydrologique, l'intensité du déplacement, etc..., leur visibilité dépend également des éléments constituants.

1. Un autre exemple très curieux est celui relevé dans une sablière voisine de Croûin où sont exploitées les alluvions quaternaires de la Charente ; un morceau de substratum crétacé a été à demi arraché (fig. 9).

2. Ces plis ne doivent pas être confondus avec les effets de véritable charriage par la glace de l'inlandsis ; bonne photographie dans Max Schneider, *Die Urkeramiker*, 1932, fig. 187.

3. B. S. G. F., 1931, passim ; *Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I.

4. Les explications fournies par les partisans de ces courants ne sont pas toujours claires. Gignoux pense que d'autres explications plus simples sont valables ; cf. *Ann. de Géogr.*, 1931, p. 610 sq.

Il arrive parfois que les anticlinaux de ces plis tendent à se rompre et à s'élever exagérément¹ ; la coupe des plis tend à ressembler à une guirlande. Ces faits sont à rapprocher de l'ascension fréquente des cailloutis situés à la base des limons où ils s'élèvent en vagues ou en colonnes². Une coupe que j'ai relevée à Pont-Arcy³ montre un fait curieux et assez voisin : les sables éocènes, inférieurs aux graviers des alluvions quaternaires, s'y élèvent en colonnes prismatiques à contours anguleux ; il semble que le mouvement se soit arrêté au moment critique où l'arrachement de ces têtes de sable allait s'accomplir et où les graviers allaient devenir cinématiquement indépendants des sables inférieurs restés en place ; à un stade légèrement plus avancé, il se serait probablement produit des paquets verticaux de sable, rappelant ce que Breuil a décrit comme « bornes » dans différentes coupes⁴.

Il peut aussi se produire de vraies failles par décrochement. Comme type particulier, j'étudierai la formation de certaines poches qui m'ont fort intrigué et dont l'origine mérite d'être discutée en chaque cas.

Les plus beaux exemples que j'ai vus étaient à Moru⁵ près Pontpoint (Oise) (fig. 12 à 16), j'en ai vu d'autres à Éragny et en forêt de Compiègne (fig. 11)⁶.

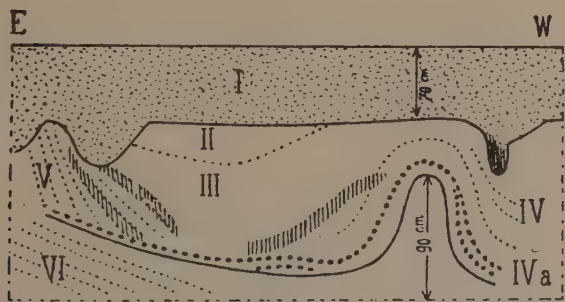


FIG. 11. — Sables quaternaires à 2 km de la Croix-Saint-Ouen, au bord de la route de Verberie (Oise).

I. Terre végétale. — II. Sable plus gras et plus jaune que III. — III. Sable. — IV. Sable calcaire jaune. — IV. A. Sable gris sale, noirâtre stratifié. — V. Sable stratifié plus gras que VI. — VI. Sable fin stratifié.

Les hachures verticales indiquent des plages rubéfiées.

1. Cf. Coupe au Buissonnet. *Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I, fig. 3.
2. Le phénomène est décrit par Bigot (*Livre jubilaire Soc. Géol. Fr.*, 1930, p. 147) à la base de certaines terres à brique du Cotentin.
3. *Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I, fig. 8.
4. *Rev. de Géogr. phys.*, 1934, p. ex. fig. 14 (3).
5. *B. S. G. F.*, 1924, p. 492, fig. 3.
6. *B. S. G. F.*, 1931, p. 329, fig. 4 ; p. 341, fig. 10 ; *Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I.

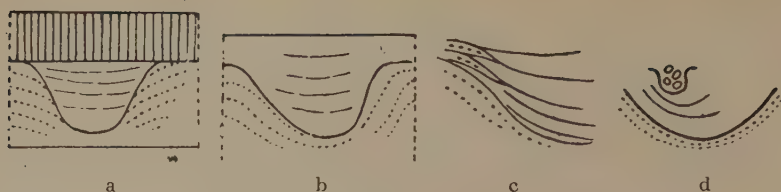


FIG. 12. — Coupes semi-schématiques dans le Quaternaire de Moru, commune de Pontpoint (Oise).

- a) Poche de limon dans les graviers montrant l'inclinaison de ceux-ci vers le centre.
- b) Poche analogue où les graviers sont encore plus inclinés, si bien qu'il y a concordance presque parfaite.
- c) Bord d'une poche avec bavures de graviers et cailloux dans le limon.
- d) Poche resserrée de cailloux dans le limon blanc.

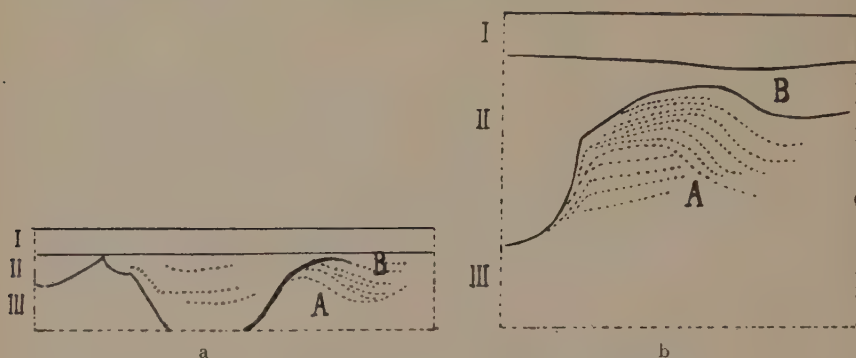


FIG. 13. — Coupe à Moru.

I. Terre végétale. — II. Poche de limon avec gravier superposé. — III. Graviers très fins entre A et B.

- a) Ensemble.
- b) Détails de la stratification entre A et B.

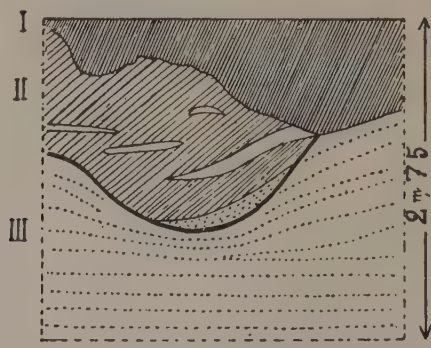


FIG. 14. — Coupe d'une poche, à Moru.

I. Terre végétale. — II. Poche de glaise verte avec lentille de limon calcaire blanc, et au fond, lentille de sable. — III. Gravier avec courbure progressivement exagérée vers le haut.



FIG. 15. — Poche, à Moru.

Coupes NE-SW et NW-SE, se raccordant, montrant la disposition des couches de limon (traits continus) et de gravier (pointillés).

En F, discordance attribuable à une petite faille de décrochement par solifluction. — La flèche indique un mince dépôt de limon blanc crayeux. D'après M. l'abbé Breuil, la rupture de couche figurée en F correspond à ce que les Anglais nomment « ice-crack ».



FIG. 16. — Prolongement de la coupe précédente.

En blanc : poche disloquée de sable jaune, au milieu des graviers dont la situation et la disposition sont indiquées par des pointillés. Les traits forts, indiquent de minces lits de limon blanc crayeux.

Les traits simples indiquent la disposition des couches dans le sable jaune.

A Moru, j'ai bien constaté que ces coupes correspondaient vraiment à des poches, non à des canaux, d'autre part, il y a des effets indéniables de solifluction, plis contournés, couches de gravier poussées en colonne ou cheminée à travers les sables superposés. Ces poches sont-elles dues à une érosion de fond ? Il y a des exemples qui rendent cette explication impossible. Y a-t-il eu une dépression originelle accrue par la solifluction ?

J'ai noté plusieurs types de poches. Dans l'une se trouvait un limon avec lits légèrement concaves vers le haut tandis que les lits ou graviers inférieurs s'inclinaient énormément et étaient inclinés de 70° à 80° ce qui indique bien une déformation ; en certains cas, d'ailleurs, le bord de la poche forme corniche. La discordance entre les graviers et le fond de la poche est plus fréquente que la concordance, ceci indique non seulement un pli mais un entraînement de la masse supérieure, par solifluction.

D'autre part, seule la solifluction peut expliquer les poches resserrées de cailloux que l'on peut observer à l'intérieur même des poches de limon blanc (beaucoup plus grandes qu'elles) — les abrupts et renversements. La solifluction peut aussi rendre compte des bavures de cailloux et graviers entraînés comme des lambeaux de charriage au sein du limon au bord des poches¹ ; ces bavures pourraient aussi bien avoir une origine sédimentaire ; si ces poches étaient nées par érosion, il y aurait eu des écoulements de graviers sur le bord de la poche ; mais il paraît inutile de recourir à cette explication puisque la solifluction, qu'il est nécessaire d'invoquer pour d'autres raisons, en rend compte. Il est à noter que les couches de gravier ne s'inclinent pas seulement mais qu'elles diminuent d'épaisseur près des poches² ; ceci s'expliquerait aussi dans le cas d'une poche par érosion, une succion du gravier et du sable vers le vide aurait été normale ; mais la solifluction rend également compte de ce fait, la pression et la possibilité d'échappement latéral du matériel ayant été plus intenses le long de la surface de contact anormal entre la masse chevauchante de limon et les graviers inférieurs. Ces surcreusements locaux en poche, sont un cas très curieux de labourage du substratum par la masse fluante ; et la conservation particulière des strates de gravier fait supposer un milieu très mal-léable, humide, fluent, vraisemblablement submergé. Peut-être y avait-il localement des points plus ou moins résistants suivant leur teneur en eau ; nous nous rappellerons ici ce que les études modernes des ingénieurs nous ont appris quant au rôle de l'eau et du tassement dans la mobilité des sables. Elles nous engagent à regarder le problème comme très complexe ; il suffit de songer à une des conclusions pratiques de ces études : lorsque l'on veut consolider un sol sableux, par exemple à l'aide d'injection de ciment, il suffit de traiter le sol jusqu'au niveau de la nappe car il ne peut y avoir de cavité au-dessous.

Il ne faut pas, d'autre part, perdre de vue les déformations des graviers encaissants, qui ont exagéré la concavité des poches.

Solifluction et nivation. Conclusions. — Salomon³ remarque que les sols rubanés se produisent dans les Alpes quand, aux

1. Phénomène analogue au Buissonnet (*Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I, fig. 4 (C 2)).

2. Voir, à ce sujet, les coupes données par Breuil (1934, fig. 20, 21), relevées en Angleterre. La figure 21 montre de véritables plissements des graviers inférieurs, avec diminution d'épaisseur près du bord de la poche. — Au Buissonnet (cf. *Mém. S. G. F.*, 1937, pl. I) en forêt de Compiègne, j'ai vu un vrai renversement avec faille inverse au contact d'une des poches.

3. 1929. Cf. *C. R. in L'Anthropologie*, 1931, p. 152.

mouvements de convexion circulaire qui donneraient en terrain horizontal et immobile un sol réticulé, s'associe la solifluction sur pente; il note qu'il n'y a pas de tjaïe dans les Alpes mais qu'un fond rocheux ou un sous-sol gelé l'hiver peut y suppléer et qu'il faut avant tout un sol *emmagasinant l'humidité*, condition très bien remplie par les sols morainiques.

Dans un pays non glaciaire, dans le Sous, Bourcart ¹ a décrit des placages de cailloutis qui seraient dus à des produits de désagrégation de reliefs émergeant du Reg et étalés par les inondations du passé (qui ont donné le limon) et par la solifluction, le limon pâteux pouvant se mouvoir même sur des surfaces strictement horizontales. D'autre part, aux environs de Liège, Fourmarier ² a décrit des dépôts de pente (linons mêlés de cailloux à la base), dépôts considérés comme récents car disposés suivant la forme actuelle du relief. Cet auteur les a comparés non au Boulder Clay vrai mais au Boulder Clay remanié par coulage et le considère comme post-glaciaire.

Ainsi, une suite de discussions amène à penser que la solifluction (*s. lat.*) n'est pas à elle seule un indice de nivation; il faut d'autres indices associés (sols polygonaux, etc...). Devant cette difficulté, il vaut mieux employer le terme de solifluction quelle que soit la cause du glissement et rechercher dans chaque cas les phénomènes connus susceptibles d'en préciser la cause.

Par contre, il y a lieu de bien distinguer les produits *autochtones* de solifluction, couches à stratification déformée mais conservée, et les produits *allochtones*, produits entièrement remaniés venant d'un transport et plus souvent sans stratification; à ces derniers, le terme de *lave* devra être réservé si l'on ne craint pas de confusions ³.

1. *Rev. Géogr. phys. et de Géol. dynam.*, 1928, p. 35-36.

2. Les prétendus phénomènes glaciaires de la Baraque Michel. *Acad. royale de Belgique*, séance du 2 juin 1923, p. 217. A propos des dépôts caillouteux des plateaux des environs de Liège. *Ann. Soc. géolog. Belgique*, 1923, *Bull.*, B 57-59.

3. Celles-ci ne paraissent pas plus à redouter qu'avec le mot tuf, par exemple; je n'ai jamais vu un géologue gêné par le sens, au moins double, de ce mot. La confusion est d'autant moins à craindre que l'on ajoute généralement, en volcanologie, un adjectif tel que basaltique au mot de lave.

On pourrait, en tout cas, préciser : lave alluviale.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES LIMONS

PAR **B. Brajnikov**¹.

Le mot *limon* (lat. *limus*, même racine que le grec *leimón*, lieu humide), désigne dans le langage courant le « dépôt de terres et de débris organiques opéré par les eaux troubles et bourbeuses » ou encore « terre molle qu'entraînent les eaux courantes »². Les géologues, les pédologues, les techniciens se sont saisi de ce mot pour désigner des choses fort variées, naturelles ou artificielles, sans apporter le soin d'en éviter l'emploi double, voire contradictoire : d'où une grande confusion dans la signification propre du terme scientifique. D'autre part, des termes, comme *vase* ou *boue*, n'ayant pas eux-mêmes de signification précise, ont été utilisés dans un sens presque identique à celui de limon.

Le terme *limon* sert actuellement dans la science et la technique pour désigner : 1° un dépôt fin fluvial, lacustre, glaciaire ou éolien ; 2° la partie fine d'un matériau meuble hétérogène quelconque ; 3° une fraction granulométrique bien définie et comprise entre 20 et 2 microns de diamètre moyen des grains.

Malgré la diversité des sens attribués à ce terme, toutes les formations qu'il sert à désigner ont en commun un caractère dimensionnel, celui de la *finesse des grains* . C'est une notion importante et féconde que nous allons essayer de développer dans la suite de ce travail.

Il semble désirable de restreindre l'emploi du terme « limon » aux seuls *ensembles géologiques*, caractérisés par des propriétés spéciales qu'il s'agit de définir, à l'exclusion des fractions granulométriques, pour lesquelles il devient nécessaire d'introduire des noms appropriés³. D'autre part, il est nécessaire d'essayer de délimiter le domaine des « limons » par rapport aux domaines propres aux autres formations superficielles qui leurs sont voisines ou ont été confondues avec eux.

1. Note présentée à la séance du 1^{er} décembre 1941.

2. Encyclopédie Larousse.

3. On est obligé de noter que la fraction granulométrique « limon », telle qu'elle vient d'être définie, n'est pas caractéristique de la plupart des *limons-roches*. En outre il est vraiment fâcheux de dire qu'un limon (roche) renferme un certain pourcentage de limon (fraction granulométrique).

Le premier point n'est qu'une question de convention facilement réglée : les mots *poussière* ou *poudre* ayant été utilisés dans le même sens granulométrique que le mot limon, rien ne s'oppose à leur adoption définitive¹. Le deuxième ne peut qu'être esquissé, dans l'état actuel de nos connaissances.

Un limon, considéré comme un dépôt naturel détritique, est un *complexe* granulométrique, défini avant tout par une grande prédominance de la finesse des grains constituants (en volume). Les recherches personnelles m'ont montré², en effet, que les maxima granulométriques (en diagrammes poids-dimension) se situent, pour les limons, entre 90 et 4 μ .

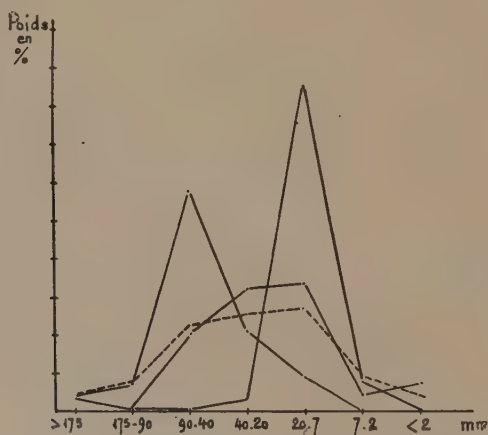


FIG. 1. — Trois espèces différentes de graphiques de limons et le graphique de la moyenne de 56 analyses mécaniques (trait interrompu).

Toutefois, il est important de noter que l'analyse mécanique, telle qu'elle est pratiquée, ne nous renseigne que sur le *comportement du matériau dans les conditions opératoires* et non sur son état d'agré-gation ou de dispersion réel.

On conçoit donc qu'employée dans un but précis, l'analyse mécanique satisfasse certaines exigences ; mais elle s'avère insuffisante dans les problèmes de lithologie théorique étudiés ici. L'imprécision des résultats qu'elle fournit croît, notamment, avec la finesse du grain, dans ces conditions il faut admettre que si la *limite supérieure des maxima* que j'ai trouvée est assez bien fondée, la limite inférieure ne peut être qu'approximative.

1. J. BOURCART. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. XI, 1941, p. 117.

2. B. BRAJNIKOV. *CR. Ac. Sc.*, 212, 1941, p. 800.

Cependant, l'important est qu'il semble possible de fixer statistiquement des limites granulométriques à un *type de complexe naturel*, tel que les limons. On pourrait donc définir de la même manière les autres types reconnus par observation courante pour aboutir à une *classification granulométrique des complexes naturels*.

En effet, si l'on considère le *type sable*¹, dont la limite dimensionnelle inférieure paraît se placer aux environs de 90 μ , on remarquera qu'à une certaine dimension voisine de 2-3 mm le grain devient relativement très rare. La *courbe de fréquence des maxima* des types *sable* et *graviers* montrera donc un minimum bien accusé vers ces dimensions. Tout porte à croire qu'un minimum du même ordre départagera le type *gravier* du type *éboulis*.

En définitive la confrontation de près de 500 analyses granulométriques de matériaux les plus divers laisse apparaître sur la courbe de fréquence des maxima l'existence de 4 minima définissant 5 *types de complexes naturels* : *éboulis*, *graviers*, *sables*, *limons*, *argiles*.

On peut traduire cette hypothèse par le schéma suivant, dont le tracé est ici purement figuratif.

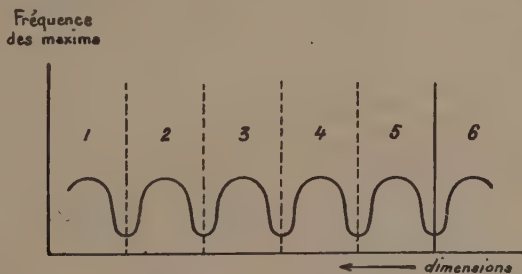


FIG. 2. — 1. Domaine des éboulis; 2. D. des graviers; 3. D. des sables. 4. D. des limons; 5. D. des argiles; 6. D. des dispersions micellaires, ioniques et atomiques.

Il est nécessaire de souligner qu'il ne s'agit nullement, sur cette courbe, de la *fréquence absolue* à la surface du globe de telle ou telle fraction dimensionnelle. Cette grandeur ne saurait être évaluée qu'en tenant compte des *volumes totaux* de chaque type de complexe, travail qui ne peut être entrepris faute de données numériques. Cette courbe doit exprimer, en réalité, la *probabilité* pour chaque fraction de constituer la *masse* d'un complexe naturel, ou, en d'autres mots, de fournir le maximum sur son diagramme granulométrique.

1. J'emploie les mots : argile, limon, sable, gravier, éboulis dans le sens de formations géologiques et non de fractions granulométriques.

On trouve deux corollaires curieux à cet énoncé : 1° certaines dimensions de grain sont plus fréquentes (en chiffres absolus) que d'autres ; 2° certaines dimensions ont tendance à s'accumuler pour constituer l'essentiel des complexes naturels, tandis que d'autres se rencontrent plutôt à l'état *dispersé* et ne s'accumulent que rarement en volume suffisant pour dominer dans un complexe. Il semble que les causes de ce *comportement sélectif* doivent être d'ordre hydrodynamique (et aérodynamique).

A ces cinq types fondamentaux il faut en ajouter un qui correspond à des conditions de transport très particulières, sans aucun classement des matériaux par ordre de grosseur. On peut y trouver côte à côte d'énormes blocs rocheux et des particules de dimensions des « suspensoïdes » (J. Bourcart), en proportions *plus ou moins équivalentes*. Sur le diagramme de fréquence de ces complexes on trouvera généralement deux ou plusieurs maxima dans des domaines différents. On pourrait l'appeler *type mixte* et il sera représenté par les dépôts glaciaires, les éboulements, coulées boueuses, etc.

Faut-il ajouter que cette classification, comme toute classification des phénomènes naturels, pêche par sa rigueur. Mais il est assez remarquable que l'existence même des types intermédiaires soulève un problème particulier, dont nous allons essayer d'esquisser une solution possible.

En première approximation, je considère toutes les formations rentrant dans les 6 types définis, comme étant d'origine détritique. On peut, empiriquement, faire ressortir deux coupures privilégiées : l'une entre les limons et les sables, l'autre entre les graviers et les éboulis. Pour les trois groupes ainsi délimités, le premier (limon, argile) est caractéristique du *transport en suspension*, le deuxième (sable, gravier) du *transport par traction* (roulage, saltation), le troisième (éboulis) du *transport sous l'action de la seule pesanteur*. Comme toujours, nous trouverons des exceptions et des chevauchements (glaces flottantes pouvant transporter tous les types de complexes, etc.).

Il apparaît donc que, dans l'*hypothèse simplificatrice de l'origine détritique*, les types de complexes correspondent aux types de transport.

Dans un diagramme d'alluvion, le grain le plus grossier correspondant à la *compétence*¹ maximum de l'agent de transport ; de même une certaine grosseur minimum correspondra à la limite de *vannage* ; les fins de dimension inférieure à cette limite seront « emprisonnés » dans les interstices des grains plus grossiers et soustraits ainsi à l'action érosive. La courbe théorique est donc une courbe de probabilité à un maximum.

1. G. K. GILBERT. The transportation of debris by running water. *U. S. Geol. Survey, Prof. Pap.*, 86, 1914.

Les courbes granulométriques de fréquence pour les types de transition peuvent se réduire essentiellement à deux espèces : courbes à un maximum, à cheval sur la dimension limite, et, courbes à deux maxima dans deux domaines différents.

Ce deuxième type, dans les complexes détritiques, mérite quelques remarques. Il est dû : soit au *déficit d'une dimension* granulométrique dans le matériau fourni, soit à la *séparation dans le temps* des deux phases distinctes du dépôt.

Ce dernier phénomène est lui-même dû à une modification dans le temps, des conditions de transport et du type de matériau transporté. Deux cas peuvent se présenter :

1° La pénétration d'un dépôt relativement grossier par un matériau fin, accompagnée généralement de *néoformations* et sortant par là même du groupe détritique proprement dit.

2° Apport d'un matériau plus grossier avec mélange consécutif (ex. éboulement sur une alluvion normale en cours de formation).

La courbe théorique correspondant à ce type de complexe doit alors être résolue en deux courbes hypothétiques, dont chacune sera étudiée séparément (fig. 3).

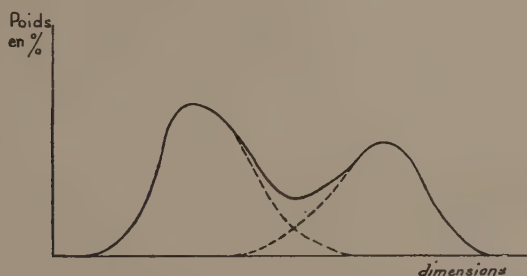


FIG. 3. — Décomposition d'une courbe à deux maxima en deux courbes hypothétiques simples.

Nous avons jusqu'à présent considéré les limons comme formations détritiques et du seul point de vue dimensionnel. Tout porte à croire, en effet, que « *limon* » est une notion granulométrique, ainsi, d'ailleurs, que les autres types établis, pour autant qu'on puisse justifier de leur origine détritique.

Ainsi conçu, le type limon couvre environ un tiers de la surface des continents (le continent antarctique excepté), d'après les évaluations grossières, mais seules possibles pour le moment. C'est le plus répandu en surface de tous les complexes naturels détritiques. Pour fixer les idées, le tableau suivant donne l'ordre de grandeur de la fréquence relative (en surface) de tous les types.

Type limon.....	35
» sable.....	16
» mixte.....	8
» gravier.....	3
» éboulis.....	3
» argile.....	?

Aucune évaluation ne peut être faite pour le type argile. Il semble que la surface qu'il occupe est très faible.

La granulométrie impose tout un faisceau de propriétés physiques d'ensemble au complexe ¹. C'est un domaine peu étudié et, à vrai dire, très mal connu. Chercher à définir les limons ou classer les complexes naturels par certaines de leurs propriétés physiques semble donc être prématuré. On ne pourrait indiquer, par exemple, que qualitativement que les limons sont moins plastiques que les argiles.

Une propriété qui servira de base à une classification doit être judicieusement choisie. Ainsi elle doit être plus compréhensive que la plasticité (dont l'extrapolation dans les domaines des complexes grossiers est dépourvue de sens), pour permettre d'embrasser toute la diversité des complexes naturels. De plus, sur la courbe représentative de cette propriété, établie statistiquement, des discontinuités ou des minima, suffisamment prononcés, doivent exister, qui justifieront la distinction des types.

Cependant, un essai de *classification quantitative* sur la base de la plasticité a été fait pour les *sols* par Atterberg ². Le principe en est le suivant :

L'expérience montre que le système à deux phases *sol + eau* peut

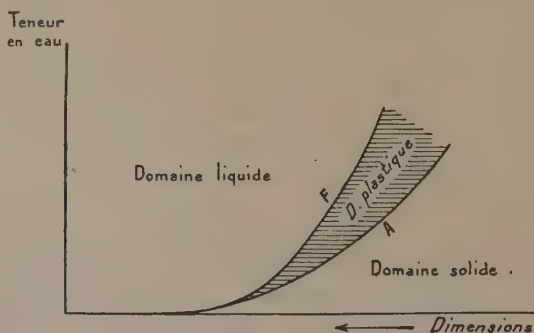


FIG. 4.

1. Cf. note 1, p. 324.

2. K. TERZAGHI. Erdbaumechanik. 1925.

se comporter comme un ensemble *liquide, plastique* ou *solide*. Atterberg définit le domaine de l'état *plastique* par deux tests fixant les limites supérieures (de *liquidité* F) et inférieure (de *plasticité* A). Il admet, en outre, que l'*indice de plasticité* ($P = F - A$), qui est un nombre, est caractéristique du matériau donné. Ce nombre variable devient nul pour certains matériaux pour lesquels l'état plastique ne peut donc pas exister.

Choisissant arbitrairement certaines valeurs de l'indice de plasticité on peut distinguer plusieurs *classes de plasticité*. Atterberg en distingue quatre :

	indice de plasticité
I ^{re} classe de plasticité.....	15
II ^e » »	15-7
III ^e » »	7-1
IV ^e » »	1

Une V^e classe s'ajoute qui englobe les matériaux meubles ne pouvant exister qu'à l'état liquide seulement (sables) (Terzaghi).

Cette classification, créée dans un but pratique, est très artificielle. En effet, l'indice de plasticité semble varier de façon continue, et aucune limite naturelle n'a encore été déterminée statistiquement, sauf pour le cas de $P = 0$, pour distinguer les différents types de complexes, comme le permet la granulométrie. De plus, les types de complexes à éléments grossiers (sables, graviers, éboulis) ne peuvent y trouver place. Il est inutile d'insister sur d'autres inconvénients inhérents à la technique et à l'interprétation des résultats de cette méthode.

L'étude de la teneur en *eau d'imbibition* d'un matériau en tassement libre sous l'eau, après agitation et sous pression normale (E_i), m'a montré que le groupement des complexes dans les limites du type limon n'est pas celui que l'on peut s'attendre à trouver en se fondant sur la seule granulométrie¹. De plus, la relation entre E_i et P, déduite empiriquement, indique une limite sable-limon qui ne coïncide pas avec la limite granulométrique. En effet, P devient nul pour $E = 18.62$. Or, plusieurs sables étudiés ont fourni des valeurs de E_i de l'ordre de 25.

Bien entendu il ne faut pas attacher trop de valeur à une pareille formule empirique, valable pour les conditions d'expérience seulement. Les extrapolations sont d'autant plus dangereuses. Et cependant, ceci permet de supposer qu'une classification fondée sur une des propriétés physiques fondamentales des complexes naturels aboutirait à l'établissement d'autres limites entre les types que celles établies ici en fonction de la granulométrie.

1. B. BRAJNIKOV. CR. Ac. Sc., 213, 1941, p. 271.

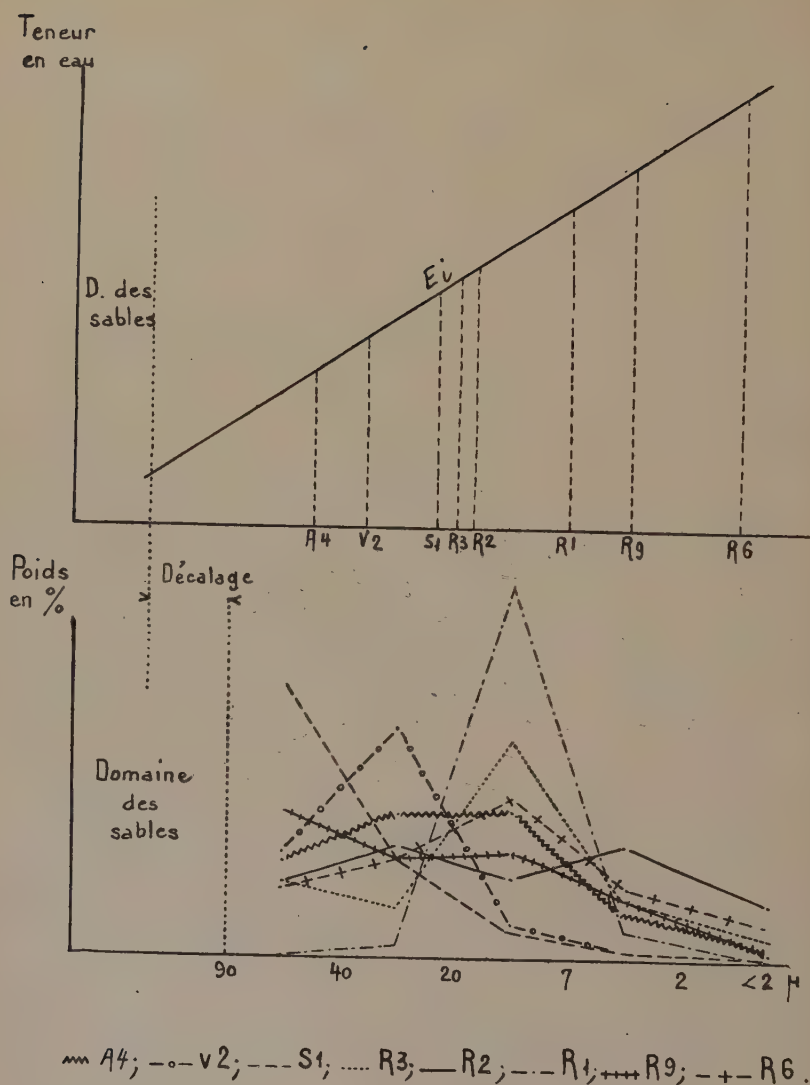


FIG. 5.

La conséquence qui en découle est d'importance. Le chevauchement des limites peut devenir d'une telle ampleur qu'il ne sera plus correct d'employer, pour la distinction des types, les termes de la classification granulométrique. Nous aurons en regard l'une de l'autre deux ou plusieurs classifications distinctes, fondées sur des caractères différents et dont les types se che-

vaucheront plus ou moins mutuellement. C'est là une des raisons de l'emploi de termes différents pour désigner une même formation et de la confusion qui en résulte.

Prenons un exemple. Un observateur qui étudie le caractère *granulométrique* d'un échantillon du fond océanique l'appellera peut-être *limon* ; un autre observateur, qui prêtera de l'importance à l'état du « tout-venant », l'appellera *boue* ou *vase*. Mais ces derniers types, étant plus compréhensifs, couvriront, par exemple, une partie du type granulométrique *sable*, tout au moins lorsqu'il s'agit de sables impurs. Nous voyons constamment des difficultés surgir de cet état de choses.

Il y a une propriété physique d'ensemble que les pétrographes mettent volontiers en relief, encore qu'il n'en considèrent que l'effet apparent. C'est la *cohésion*. Nous entendons donc fréquemment les deux expressions : roches *meubles* et roches *cohérentes*. Sans vouloir entrer dans la discussion des causes probables de la cohésion, nous retiendrons qu'elle est fonction de la granulométrie du sédiment¹ et nous en distinguerons pour l'instant deux sortes : *cohésion par hygroscopicité* (cohésion apparente de Terzaghi) et *cohésion par cimentation*. (D'autres causes, telles que l'intensité du champ électrostatique, peuvent être *spécifiques* du matériau)².

Terzaghi voit la cause de la *cohésion apparente* (la résistance au cisaillement peut, dans ce cas, atteindre le chiffre impressionnant de 100 kg/cm²) des poudres dans la *tension superficielle* de l'eau capillaire du sédiment séché à l'air. Plus le grain et les pores du sédiment sont fins, plus la pression capillaire et, par conséquent, la cohésion sont élevées. Il en résulte qu'un limon déposé sous l'eau et porté à l'air libre devient, par le fait même du dessèchement, un dépôt cohérent, au contraire de ce qui se passe pour les sables purs. Les limons déposés par le vent ne pourront rester meubles que dans les conditions de sécheresse ; l'imbibition par la pluie, la rosée, etc., les transformera en dépôts cohérents.

Inversement, une dispersion théoriquement parfaite (si nous négligeons les effets de la *cohésion vraie* de Terzaghi, toujours faible) est atteinte en inondant abondamment le sédiment d'eau, car la pression capillaire disparaît dans un temps plus ou moins bref. C'est la propriété bien connue des géologues, le délayage spontané de certaines roches dans l'eau.

On peut donc généraliser ces considérations en disant que : les cinq types granulométriques établis précédemment se laissent

1. K. TERZAGHI, *loc. cit.*

2. Cf. note 1, p. 329.

partager en deux groupes, dont le premier (éboulis, graviers, sables) comprend les dépôts essentiellement meubles et le deuxième (limons, argiles) comprend les dépôts essentiellement cohérents.

Le tableau suivant résume, sous une forme schématique, les résultats auxquels permet d'arriver l'étude granulométrique des complexes détritiques.

Classification granulométrique				États caractéristiques		Mode de transport caractéristique	Surfaces occupées sur les continents (sauf Antarctique) en % de la surface totale
Dimension limite en mm.	groupes	sous groupes	types	cohésion par hygros-copacité	plasti-cité		
?	I	1	éboulis	meuble	liquide	pesanteur	3
		2	gravier			roulage	3
			sable				16
0,090	II	3	limon	cohérent	liquide plastique solide	suspension	35
0,004			« argile »				très petite

Il résulte de ce qui précède que la variété sera très grande des formations groupées dans le type limon précédemment établi. Cette variété dépendra : 1° de l'*origine* primaire des éléments détritiques constitutifs ; 2° de la *nature* minéralogique et chimique des constituants ; 3° du ou des *milieux* dans lesquels prend naissance et existe le complexe ; 4° des vicissitudes qu'il aura subi depuis son dépôt ou mieux, de son *évolution*.

Si la notion de l'origine des constituants peut être essentielle sous certains aspects de la géologie régionale, par exemple, elle est subsidiaire dans le cadre d'une étude générale du complexe en lui-même, et de son évolution. Qu'un grain minéral soit sorti de la bouche d'un volcan, qu'il soit le débris d'un organisme ou d'une roche de la surface de la Terre, qu'il vienne de l'espace interstellaire, cela n'a pas d'importance du moment que

ce grain est incorporé dans un dépôt. Nous retiendrons ses *propriétés*, mais non son origine, que nous ignorons, d'ailleurs, le plus souvent.

Par contre, les trois dernières notions sont d'une haute importance et, de plus, sont intimement liées. Car, *l'évolution n'est que l'adaptation de la nature du dépôt aux conditions du milieu*.

Sans vouloir passer en revue les différentes associations minéralogiques que l'on rencontre dans les limons (ce qui n'aurait qu'un intérêt statistique et, par surcroît, elles sont très imparfaitement connues), je vais me borner à essayer de dégager quelques principes généraux que l'on peut, dès maintenant, entrevoir et qui caractérisent l'ensemble du type et son évolution.

L'association minéralogique *allotigène*¹ d'un limon sera régie par les facteurs suivants :

1° l'*abondance* spécifique, absolue et relative (régionale);
2° la *stabilité* spécifique vis-à-vis des agents de destruction chimiques et physiques.

3° l'étendue et le relief de la *province d'alimentation* et son caractère climatique, qui conditionnent la durée du parcours (du lieu d'origine au lieu du dépôt) et d'exposition à l'activité destructive, ainsi que l'intensité de celle-ci.

Le jeu des deux premiers facteurs détermine que le quartz, minéral extrêmement abondant et très stable, domine de beaucoup tous les autres minéraux dans l'ensemble du type, à telle enseigne que l'on peut dire, sans grande erreur, que les domaines des sables et des limons sont en même temps le domaine minéralogique du quartz.

Mais à l'encontre des sables, dans lesquels la proportion du quartz peut atteindre 95 % et plus, et qui sont donc quelquefois des formations pratiquement *monominérales*, les limons ne paraissent jamais l'être. Nous ne retrouverons des genres monominéraux qu'à l'extrémité de l'échelle granulométrique dans le type des argiles.

Les raisons de cette particularité des limons sont encore obscures, mais paraissent être en partie d'ordre granulométrique.

Les substances pouvant se présenter *en masse* à côté du quartz sont essentiellement : les carbonates, les phyllites (au sens large du mot), les hydroxydes, les feldspaths. Les minéraux dits « lourds » et la matière organique ne dépassent guère 1 % chacun. Les feldspaths et les hydroxydes paraissent pouvoir atteindre 10 % et plus ; les phyllites — environ 30 % et les carbonates 50 % du total, en général.

Les pédologues ont depuis longtemps constaté que dans les sols arables il y a lieu de distinguer : 1° le *squelette* et 2° la *matière « vaseuse »*. C'est cette dernière qui constitue le *milieu*

1. Authigène — d'origine *in situ* ; allotigène — d'origine extérieure. Termes dus à Kalkowsky.

nutritif, dans lequel sont cantonnés les processus physico-chimiques et biologiques. La distinction originelle, satisfaisante pour les buts pratiques, était d'ordre granulométrique (la limite entre les deux fractions étant vers 0,05 mm). Nous pouvons concevoir cette utile discrimination du point de vue physico-chimique, en écartant, en principe, la distinction granulométrique. Nous distinguerons donc les constituants *inertes*, dont la participation aux processus physico-chimiques semble être nulle ou très réduite, et les constituants *actifs* qui sont le véritable siège de ces processus (matières ionogènes, matières organiques, colloïdes, phyllites). Cette distinction est fondée à la fois sur la nature minéralogique et le degré de finesse des éléments. En effet, ces processus étant des *phénomènes de surface*, leur intensité est proportionnelle au degré de division de la substance ¹.

Faut-il ajouter que cette « activité » est spécifique et est extrêmement variable d'une substance à l'autre et, pour une même substance, suivant le milieu ambiant. Mais nous n'avons d'autre possibilité actuellement, que de la considérer dans son ensemble.

Les constituants inertes sont, par excellence, d'*origine allotigène* ; il n'en est pas ainsi pour les constituants actifs. L'information nous manque pour les classer avec certitude. Nous pouvons, par groupe et en partie, leur assigner une origine dans des cas particuliers, sans pouvoir généraliser.

Toutefois, il y a lieu de distinguer le mode de transport et d'accumulation de la formation. Le transport par le vent *en milieu aérien* fournira uniquement des matériaux allotigènes, ce milieu n'étant pas propice aux phénomènes de réactions physico-chimiques. (La signification et la portée réelle de quelques facteurs qui pourraient intervenir nous est totalement inconnue.)

Au contraire le *milieu aqueux* est éminemment favorable aux processus physico-chimiques et biologiques ; la discrimination entre les substances authigènes et allotigènes d'un sédiment y est souvent des plus subtiles et c'est à ce milieu seulement que les quelques considérations qui suivent se rapportent.

Les silicates (feldspaths, phyllites), pour autant que nous savons les reconnaître, semblent être, dans les dépôts détritiques actuels, d'origine allotigène. Un doute subsiste pourtant pour les phyllites du genre allophane, pour la glauconie (notamment dans le milieu marin) etc. Pour le juger il nous faudrait, tout au moins, avoir des idées claires sur les *conditions naturelles* dans lesquelles peuvent intervenir les réactions entre les hydroxydes de fer et d'aluminium et la silice, de même que sur la *vitesse* de celles-ci.

1. B. BRAJNIKOV. CR. Ac. Sc., 214, 1942, p. 374.

Ceci nous amène au problème des hydroxydes, de la silice colloïdale, des gels mixtes, etc. Pour certaines formes, comme la limonite, on peut souvent démontrer leur origine détritique ; mais les formes *colloïdales* semblent surtout être d'origine authigène, c'est-à-dire floculées sur place par action des organismes, ou de la matière organique en solution dans l'eau, ou par les électrolytes. Il semble probable, que, dans certains cas tout au moins, les flocons peuvent être amenés et déposés sous forme détritique ¹.

Il en est de même pour les carbonates et la matière organique. Lorsqu'ils se présentent sous la forme de fragments d'organismes ou de minéraux, leur origine détritique n'est pas douteuse. La difficulté surgit, par exemple, pour les carbonates se présentant en poudre fine, à laquelle l'inspection microscopique ne permet d'assigner aucune forme caractéristique. Il semble, toutefois, qu'en l'absence de concrétionnements, d'encroûtement, de cristallisation nette, on puisse avec beaucoup de probabilité leur assigner une origine allotigène.

Dans le cas contraire ce n'est que les phénomènes de remaniement qui peuvent servir de guide.

La *distribution* des constituants minéraux des limons par fractions granulométriques a été très peu étudiée. Néanmoins il semble que l'on puisse la représenter, avec une bonne approximation, sous la forme graphique suivante, très schématisée d'ailleurs.

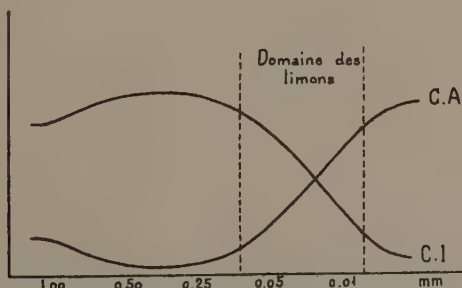


FIG. 6. — C.A. constituants actifs ; C.I. constituants inertes.

Ce graphique montre que le domaine granulométrique des limons occupe une situation privilégiée couvrant la zone d'inflexion des deux courbes et leur point d'intersection unique. Ceci entraîne plusieurs conséquences importantes, dont j'indiquerai les trois suivantes.

Tout d'abord il nous montre la *cause granulométrique* dont

1. J. BOURCART. *Ann. Tr. Publ. et Bat.*, déc. 1939.

nous avons parlé plus haut (p. 333), pourquoi les formations monominérales sont pratiquement inexistantes dans le domaine des limons.

Ensuite, on y trouve la raison de l'*activité physico-chimique* considérable des limons par rapport aux sables, ce qui a une grande signification pour leur évolution géochimique. (Du point de vue pratique c'est par exemple leur fertilité relative qui est mise en évidence.)

Enfin, certaines propriétés physiques d'ensemble, qui paraissent être indépendantes de la granulométrie, mais qui diffèrent profondément entre le type sable et le type limon, y trouvent leur explication ¹.

J'ai insisté plus haut sur la distinction entre les substances d'origine authigène et allotigène. En réalité, pour ce qui est traité dans cet essai, ce n'est pas cette origine en elle-même qui est intéressante, mais la conséquence qui en découle et dont la portée ne peut être surestimée.

C'est l'aspect *énergétique* du problème.

La discrimination entre les deux origines possibles devient alors la discrimination entre la substance qui *vient de naître* et la substance *vieillie*. L'image est familière dans l'étude des colloïdes, et les cas pouvant servir à l'illustrer ne manquent, certes, pas.

Il en résulte que, outre la composition chimique, révélée par l'analyse, c'est l'*état* de la matière qui doit entrer en considération en première ligne. Malheureusement, l'étude de cet état en lithologie est très peu avancée; il faut reconnaître d'ailleurs, que les méthodes dont on peut se servir à cette fin sont bien précaires.

Ceci est surtout vrai pour les substances inorganiques, car en ce qui concerne la matière organique les efforts des pédologues ont permis d'élaborer certaines méthodes (telles que l'analyse rationnelle des matières « humiques », le dosage des composés azotés, etc.) qui autorisent à conclure, avec une probabilité plus ou moins grande, sur l'état de transformation de cette matière.

Par contre, l'analyse mécanique ignore par principe l'état des éléments, qu'elle considère tous sous leur aspect dimensionnel uniquement. Une paillette de koalinite et une algue vivante sont équivalentes, si leurs dimensions sont équivalentes. Tout au plus estime-t-elle que les états instables augmenteront la proportion des particules fines (colloïdales). Encore faut-il qu'elle soit sûre de les disperser suffisamment.

1. Cf. note 1, p. 329.

C'est en tenant compte de cet aspect énergétique, qui se manifeste dans l'état dans lequel peuvent se présenter les éléments constitutants, et de la déficience de l'analyse mécanique pour une telle discrimination, que j'ai introduit, dès le début, l'hypothèse simplificatrice de l'origine *détritique* des limons. Elle n'est pas rigoureusement vraie, car à aucun moment nous ne pouvons saisir dans la nature le dépôt, voire même le débit solide qui lui donnera naissance, en dehors des processus physico-chimiques et biologiques ubiquistes et continuels.

Il y a pourtant une différence *quantitative* considérable qui justifie, je crois, la distinction entre les limons et les vases, par exemple (termes que l'on a employés dans le même sens) et qui pour moi, diffèrent profondément par leur *état*.

Dans cet ordre d'idées, je considérerais volontiers les vases comme des sédiments *mixtes*, où la partie authigène joue dans le complexe un rôle aussi important que la partie détritique, sinon plus. On peut donc dire que les vases ne peuvent trouver place dans la classification granulométrique exposée ici (p. 325). C'est une formation appartenant à une autre classe de dépôts que la classe détritique, pour laquelle seulement la classification granulométrique est valable, et l'interprétation de leurs courbes granulométriques ne serait valable que pour la partie détritique seulement. Les termes « vase sableuse » et « sable vaseux », employés par MM. J. Bourcart et C. Francis-Bœuf ¹, s'ils doivent avoir une signification autre que celle de termes purement descriptifs, exprimeraient, à mon avis, la proportion relative des constituants authigènes et allotigènes.

D'autre part, nous nous trouvons dans la nature devant des formations qui dérivent indubitablement des limons détritiques, dont elles conservent beaucoup de caractères, mais qui, étant d'âge relativement ancien, ont subi des transformations plus ou moins profondes et apparentes. Telles sont les formations bien connues dans le Bassin Parisien sous le nom de « limons des plateaux ». Peut-on légitimement les ranger dans la même rubrique avec des limons détritiques proprement dits? J'estime qu'on peut le faire, sous réserve qu'elles aient conservé les caractères fondamentaux des limons, tels qu'ils ont été définis précédemment, et à la condition de marquer les transformations subies par un qualificatif approprié, tels que « limons évolués », par exemple ².

1. J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF. *CR. Ac. Sc.*, 209, 1939, p. 568.

2. B. BRAJNIKOV. Quelques considérations sur l'évolution des limons. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, séance du 16 mars 1942.

18 décembre 1942.

Bull. Soc. Géol. Fr. (5), XI. — 22

C'est ainsi qu'en conservant l'hypothèse simplificatrice introduite au début, mais en lui attribuant un sens plus large, j'entends réserver le nom de *limon* aux formations détritiques pures ou évoluées, la différence n'étant que quantitative et l'écart relativement peu important. C'est sur ces deux groupes de formations que j'ai établi les caractéristiques du *type limon*, et leur très bon accord justifie cette manière de voir.

Le tableau schématique suivant est destiné à montrer la place qu'occupe le type limon, ainsi défini, dans tout l'ensemble des roches.

R. de	{	non métamorphisées	
profondeur		métamorphisées	
R. de	{	diagénisées	métamorphisées
			non
		non	métamorphisées
			métasomatisées { <i>limons évolués</i>
			(grès, etc.)
			authigènes
surface	{	non	mixtes { <i>limons</i>
			métasomatisées { allotigènes { sables, graviers, etc.

Dans ce schéma très succinct nous nous trouverons sans doute devant des cas douteux ou des convergences. Ce schéma n'est pas une classification, mais seulement une méthode de classement qui doit en quelque sorte résumer ce qui précède en donnant un aperçu plus général du problème.

OBSERVATIONS AU SUJET DES LIMITES
ET DE LA SUBDIVISION DU STAMPIEN A PROPOS
D'UNE NOTE DE G. DENIZOT¹.

PAR **H. Alimen**².

M. G. Denizot à qui nous devons de nombreuses et très judicieuses observations et interprétations relatives au Stampien du Bassin parisien, vient de préciser dans une note récemment publiée, les divergences entre ses opinions et celles que j'ai exposées dans ma thèse.

1. *Limite inférieure du Stampien.*

Cette limite inférieure est à nouveau remise en question. Notre confrère donne une coupe détaillée de la région d'Argenteuil-Cormeilles, où il classe sous le nom d'*Assise de Sannois* (épaisseur 7 m.) un ensemble où jusqu'ici l'on était d'accord pour distinguer : à la base la *Molasse de Sannois* (épaisseur 2 m.), au-dessus les *Marnes à Huîtres* (épaisseur 5 m.). Le niveau auquel M. Denizot conserve le nom de *Marnes à petites Huîtres* (2 à 3 m.) est un niveau argilo-sableux, riche en fossiles, où apparaissent les espèces de Jeurre, et qui constitue la *Zone de passage des Marnes à Huîtres aux Sables supérieurs*³.

L'opinion classique depuis Munier-Chalmas est de faire débiter le Stampien à la base des Marnes à Huîtres, en laissant dans le Sannoisien la petite assise saumâtre de la Molasse de Sannois. La controverse soulevée par M. Denizot porte donc, non sur la totalité de son « Assise de Sannois », mais sur sa base (Molasse de Sannois) épaisse de 2 m. J'ai laissé cette couche dans le Sannoisien, tout en marquant qu'on pourrait songer à l'englober dans le Stampien puisqu'elle représente la première incursion marine au-dessus de la « Marne verte »⁴. Mais d'une part cette

1. G. DENIZOT. Le Stampien de la région parisienne et le classement de l'Oligocène. *B. S. G. F.* (5), t. X, 1940, p. 25-47.

2. Note présentée à la séance du 15 décembre 1941.

3. H. ALIMEN. Le Stampien du Bassin de Paris. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, n° 31, 1936, p. 166-171.

4. H. ALIMEN. *Op. cit.*, p. 9.

formation, très localisée géographiquement, passe latéralement au Calcaire lacustre de Brie. D'autre part la faune de ce petit niveau contient des éléments tongriens prédominants (*Cytherea incrassata* SOW. T. C., *Cardium Defrancei* DESH. A. C., *Natica achatensis* RECLUZ A. R., *Cerithium plicatum* BRUG. T. C. et *C. Weinkauffi* Tournouër probable) auxquels s'associent quelques éléments nouveaux (9 espèces nouvelles dans l'état actuel de nos connaissances, dont 6 sont des fossiles banaux de l'Oligocène marin et 3 seulement sont spéciales au Rupélien : *Tellina Heberti* DESH., *Melania semidecussata* LMK., *Tornatina exerta* DESH.¹). Ces considérations m'ont engagée à ne pas modifier une limite d'étage devenue classique, d'autant que, lorsqu'on cherche à établir des parallélismes d'un Bassin à un autre, on ne peut songer à le faire avec une précision qui soit à l'échelle de la petite assise de la Molasse de Sannois.

2. Émersion à la limite Sannoisien-Stampien en quelques points du Bassin de Paris.

J'ai décrit de Chagrenon près d'Étampes, des traces d'émersion à la partie supérieure du Calcaire de Brie, d'après des observations faites en 1930. M. Denizot, dans la même localité n'a pas revu ces détails en 1936. Les observations en ces points, sont actuellement très difficiles. Mais les conditions de faciès indiquent pour le début du Stampien (Molasse d'Étréchy aussi bien que Marnes à Huîtres) des conditions de profondeur très faible, sans cesse voisines de l'émersion et la proximité de masses d'eaux lacustres et de terres émergées. D'ailleurs M. G. Denizot décrit de Bagneux (fig., 4, p. 40) ce qu'il appelle un *recouplement* de couches, ne voulant pas y voir la marque d'une émersion. Cette seconde hypothèse cependant ne me paraît pas exclue, en tout cas cette disposition implique des conditions très littorales de dépôt, confirmées par les caractères de la faune stampienne que j'ai recueillie en cette même localité.

3. Subdivision du Stampien en 2 horizons.

Il y a dans la région d'Étampes deux ravinements, l'un dit d'Étréchy, qui est légèrement postérieur au dépôt du falun de Morigny, l'autre, le ravinement de Pierrefitte, qui est postérieur au falun de Vauroux, antérieur à celui de Pierrefitte. L'allure

1. H. ALIMEN. *Op. cit.*, p. 10 et 263-264.

ravinante du conglomérat de Pierrefitte, qu'il faut distinguer des galets de Saclas, est nette près du Moulin de Vaujouan et au Stade d'Étampes. L'existence de galets roulés de grès à fossiles stampiens dans le conglomérat qui est à la base du falun à Pierrefitte est une autre preuve d'une émigration avant le dépôt du falun de Pierrefitte¹.

M. Denizot préfère établir la coupure du Stampien en 2 horizons à la faveur du ravinement d'Étréchy. Par contre je la place au ravinement de Pierrefitte parce que la faune de Vauroux (sablière de Vauroux et rue Saint-Antoine à Étampes) est celle de Jeurre-Morigny appauvrie, avec un seul élément nouveau *connu par un seul exemplaire* (*Cerithium Lamarcki* BRONGN.) cité par Cossmann et Lambert, tandis qu'au-dessus du ravinement de Pierrefitte apparaissent d'excellentes espèces nouvelles, abondamment représentées.

D'ailleurs des sondages font connaître entre le falun de Morigny et le ravinement de Pierrefitte des faunes qui sont incontestablement du Stampien inférieur (compris comme l'ensemble Étréchy, Jeurre, Morigny, Vauroux²) sans trace du renouvellement de Pierrefitte. Ce sont : la *faune de Lhumery*, qui stratigraphiquement se place au-dessus de Jeurre-Morigny, dans la deuxième moitié du Stampien inférieur, immédiatement au-dessous du ravinement d'Étréchy, et la faune de *Mondésir*, qui se situe tout à fait au sommet du Stampien inférieur (dans la même situation que le falun de Vauroux), juste sous les galets de Saclas. Dans cette dernière, 2 espèces seulement du Stampien supérieur font leur apparition : *Cerithium Lamarcki* BRONGN., (comme à Vauroux) et *C. petrafixense* COSSM. et LAMB., toutes deux extrêmement rares d'ailleurs dans ce niveau.

Pierrefitte et Ormoy constituent, après le renouvellement de Pierrefitte, un second groupe évolutif, nettement différent du premier, et lui aussi très homogène.

Je tiens à nouveau à souligner qu'il est impossible de paralléliser à distance tel ou tel gisement (Romainville, Cormeilles³) avec Jeurre ou Vauroux. Il n'y a, dans chacun des deux horizons du Stampien, d'autres différences entre les divers faluns d'Étampes que des différences de faciès. On ne peut, d'une faune stampienne hors de la région d'Étampes, préciser que son appartenance au Stampien inférieur ou au Stampien supérieur.

1. H. ALIMEN. *Op. cit.*, p. 92, fig. 11 ; p. 82, fig. 9 ; p. 23 et 237.

2. H. ALIMEN. *Op. cit.*, p. 83-88.

3. M. Denizot parle à Montlhéry de « Stampien supérieur », c'est-à-dire, précise-t-il « postérieur à Morigny ». Il n'y a aucune faune en ce point. Il paraît bien difficile d'y faire des coupures dans les sables stampiens.

4.. *Rivages stampiens.*

M. Denizot s'est basé sur l'allure des lignes de galets (cordons non littoraux à son sens, mais quittant le rivage pour « se lancer en flèche en pleine extension ») pour dessiner un tracé des lignes de rivages au Stampien inférieur et au Stampien supérieur (fig. 5, p. 42). C'est sur des arguments paléontologiques que je me suis appuyée (analyse de la faune du sondage de Sermaises) pour conclure, avec réserves d'ailleurs¹, que le Stampien inférieur descendait plus bas vers le Sud que le Stampien supérieur dans la vallée de la Juine. La discussion relative aux rivages stampiens ne me paraît pouvoir être reprise avec fruit que le jour où de nouveaux sondages apporteraient plus de précision sur l'âge des sables qui jalonnent en profondeur l'extension maximum de la formation stampienne vers le Sud.

1. H. ALIMEN. *Op. cit.*, p. 247.

L'INVERSION CHEZ LES LAMELLIBRANCHES

PAR Colette Dechaseaux¹

I. GÉNÉRALITÉS.

Le phénomène d'inversion chez les Lamellibranches est surtout connu chez les Rudistes dont les formes « inverses » dépassent de beaucoup en nombre et en diversité les formes « normales ». Cette famille mise à part, on croit généralement que l'inversion est très rare chez les Lamellibranches, beaucoup plus que chez les Gastéropodes. Une statistique établie par Popenoe et Findlay (21)² montre qu'il n'en est rien : on trouve un échantillon inverse respectivement sur 180 *Venericardia*, 130 *Astarte*, 3 *Goodalia* tandis qu'il y a seulement un individu inverse sur 300 *Helix pomatia*, 150.000 *Clausilia biplicata* ou 3.000 *Clausilia bidentata*. Cette erreur d'appréciation tient à ce que le phénomène est visible même sur de mauvais échantillons de Gastéropodes, tandis que pour l'observer chez les Lamellibranches il faut des coquilles dont la charnière et les crochets soient en bon état.

Définition de l'inversion : l'inversion dans le genre *Chama*.

C'est en 1882 que Munier-Chalmas (18) définit cette notion en prenant comme base d'observation le genre *Chama*. Il remarque, à la suite des auteurs qui ont étudié les Chames, que quelques espèces sont « sénestres » et comme « on ne peut démontrer la sénestrosité d'un mollusque acéphale qu'en le comparant à un autre type du même groupe dont tous les organes sont symétriquement disposés dans un ordre inverse et que l'on sera convenu d'appeler dextres » les *Chama calcarata*, *lamellosa* ayant été considérés comme des formes dextres, *Chama retroversa*, *Janus*, *fimbriata* sont sénestres. Quelles sont donc les particularités présentées par les espèces de *Chama* ?

1° Il y a des espèces fixées par la valve droite (*Chama calcarata*) et d'autres qui le sont par la valve gauche (*Chama retroversa*).

1. Note présentée à la séance du 15 décembre 1941.

2. Les numéros en caractères gras renvoient à la bibliographie.

2° Selon les espèces c'est la valve droite ou la valve gauche qui a une charnière composée des mêmes éléments (fig. 1) : c'est

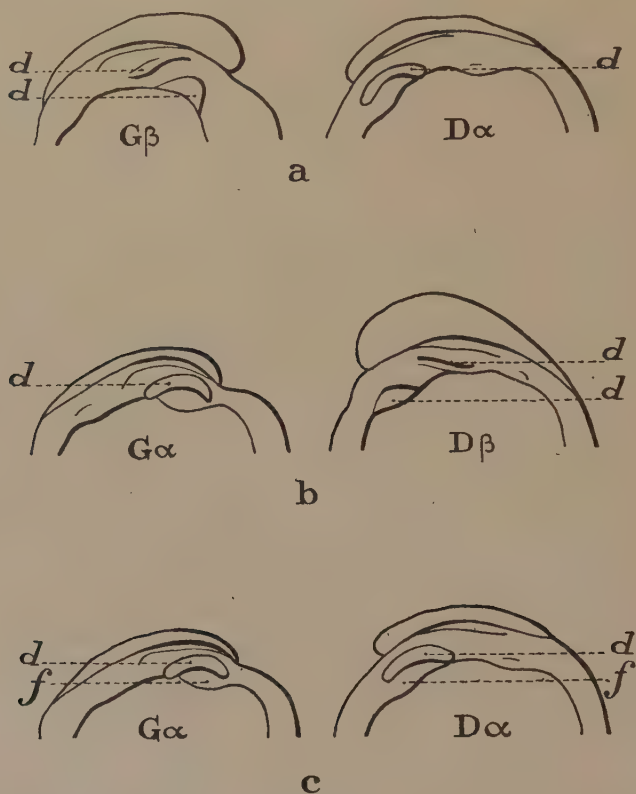


FIG. 1. — a, *Chama* normal; D, valve droite; G, valve gauche fixée; d, dent (d'après Fischer);
b, *Chama* inverse; D, valve droite fixée; G, valve gauche;
c, Symétrie de la valve gauche (valve libre) d'un *Chama* inverse et de la valve droite (valve libre) d'un *Chama* normal; d, dent
f, fossette.

ainsi que la valve droite de *Chama calcarata* et la valve gauche de *Chama retroversa* ont une dent et deux fossettes¹, la valve gauche de *Chama calcarata* et la valve droite de *Chama retroversa* ont deux dents et une fossette. Les termes de valve droite et de valve gauche ne signifient donc rien, ainsi que le remarque Munier-Chalmas, quant au type de charnière ou au mode de

1. D'après F. BERNARD (*B. S. G. F.* (3), t. XXIII, 1895) il y a parfois des rudiments de dents latérales à chaque valve: ces formations n'étant pas constantes elles n'interviennent pas dans la définition de l'inversion.

fixation, aussi l'auteur leur substitue-t-il les dénominations α et β . « Je prendrai comme type de la valve α , la valve libre des *Chama*, la valve β correspondra au contraire à la valve fixée des *Chama*. »

Les auteurs ont ensuite précisé les caractéristiques des valves α et β en étudiant la charnière et le sens de l'enroulement des crochets.

Charnière.

F. Bernard (1), dans son traité de Paléontologie, énonce d'une façon très claire les traits de la charnière de chaque valve, « la valve α de *Chama* (valve droite libre de *Chama calcarata* ou valve gauche libre de *Chama retroversa*) est caractérisée par le fait que du côté antérieur, une fossette se trouve avant la première dent ».

La valve α de *Chama calcarata* étant par définition une valve droite, *Chama calcarata* est une forme normale ou dextre. *Chama retroversa* ayant la valve gauche de type α est une forme inverse ou sénestre. L'inversion est ainsi nettement définie dans le genre *Chama* et peut se résumer de la façon suivante :

Valve libre, α , dont la charnière montre du côté antérieur
une fossette précédant une dent ; valve fixée β .

valve droite libre

valve gauche libre



forme normale

forme inverse

Généralement les formes normales et les formes inverses appartiennent à des espèces différentes. On connaît néanmoins des espèces qui ont des individus dextres et d'autres sénestres. Lamy (16) cite *Chama venosa* REEVE : sur trois coquilles provenant de l'isthme de Panama, deux individus sont normaux et un inverse. Le cas le plus connu est celui de *Chama pulchella* dont la valve libre α est indifféremment la droite ou la gauche. Ces espèces sont des formes amphidromes [un même parent donne naissance à des individus dextres et à d'autres qui sont sénestres (Pelseneer) (20)]. Nils Odhner (19) qui n'admet pas l'existence de formes inverses et qui les groupe dans un genre nouveau *Pseudochama*, voit dans les individus inverses l'espèce *P. similis* et dans les espèces normales *Chama lazarus*. Les auteurs n'ont pas adopté l'opinion de Nils Odhner.

*Enroulement*¹.

Soit un *Chama* normal, la valve gauche est fixée, les crochets s'inclinent à droite : si la coquille est placée sur la valve gauche, la charnière en haut, les crochets allant de gauche à droite, (sens des aiguilles d'une montre) l'enroulement est dextrogyre ; il est sénestrogyre pour la valve droite (libre, α).

S'il s'agit d'un *Chama* inverse, la valve droite est fixée, les crochets vont de droite à gauche (enroulement inverse de celui des *Exogyres*), l'enroulement est sénestrogyre ; il est dextrogyre sur la valve gauche (libre, α).

Chez *Chama*, le sens de l'enroulement permet donc de reconnaître si la forme est normale ou inverse ; à un enroulement sénestrogyre de la valve libre correspond une forme normale, à un enroulement dextrogyre, une forme inverse.

L'inversion chez les Rudistes.

La notion d'inversion a été étendue aux Rudistes. En 1882, en effet, Munier-Chalmas écrivait : « les *Diceras* sont très voisins des *Chama* ; rien n'est plus facile que de démontrer leur filiation ». Douvillé partageait cette opinion dans ses premières notes sur les Rudistes ; plus tard, il montre que les *Chames* « ont une origine tout à fait différente, l'analogie des formes n'étant qu'un phénomène de convergence, résultant d'un mode de fixation analogue ». Quoi qu'il en soit la distinction des formes normales et inverses a été maintenue. Il est curieux de noter qu'elle a eu pour point de départ une hypothèse erronée à savoir que les *Chames*, chez lesquels la notion a été définie, était étroitement apparentés aux Rudistes.

L'inversion chez les Rudistes, comme chez les *Chama*, est étudiée au triple point de vue de la fixation, de la charnière, et de l'enroulement des crochets.

Fixation.

Sil'on met à part les *Diceras*, on peut grouper tous les Rudistes en deux séries : une première série comprend les formes fixées par la valve gauche, la valve droite étant libre (*Heterodiceras*, *Requienia*, *Toucasia*, *Matheronia*) ; une deuxième série, beaucoup plus importante que la première, réunit toutes les formes fixées par la valve droite, la valve gauche étant libre. En appliquant

1. LAMY, *loc. cit.*, p. 294.

à ces deux séries la définition de Munier-Chalmas citée p. 345, la première série qui a la valve droite libre α est une série normale, la deuxième série qui a la valve gauche libre α est une série inverse. Le cas du genre *Diceras* est spécial car la fixation se fait, selon les espèces, soit par la valve droite (*Diceras* s. str.), soit par la valve gauche (*Epidiceras*). Dans les deux cas les valve droite et gauche sont respectivement construites sur le même type: une valve droite d'*Epidiceras* a une charnière en tous points semblables à celle d'une valve droite de *Diceras*: la fixation n'est donc pas liée ici à des modifications de charnière. Rappelons que la valve droite de *Diceras* (fig. 2) a du

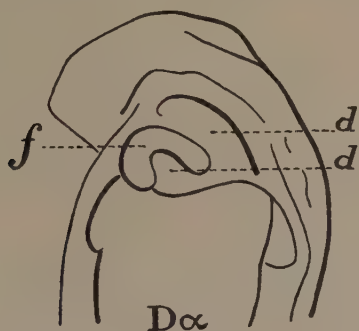


FIG. 2. — Valve droite de *Diceras*; d, dent; f, fossette.

côté antérieur une fossette entourant une dent, c'est donc une valve α ; les *Diceras* sont donc tous dextres contrairement à l'opinion de Deshayes qui, interprétant mal un *Diceras*, lui donna le nom de *Diceras sinistrum*.

Charnière.

Douvillé considérant l'ensemble des charnières des Rudistes aboutit au même résultat que celui auquel conduit l'examen des caractères de la fixation. Il publie en 1886 (9) une première note dans laquelle il constate que dans tout un groupe de Rudistes: *Diceras*, *Heterodiceras*, etc., la charnière est formée de deux dents à la valve droite, une à la valve gauche. Dans un autre groupe, on observe la disposition inverse: deux dents à la valve gauche, une à la valve droite; ce deuxième type correspond aux formes inverses, le premier aux formes normales; en même temps, on note à nouveau que la série définie comme étant normale du point de vue de la charnière, est fixée par la valve gauche, à l'exception des *Diceras* s. str., tandis que la série inverse l'est par la valve droite.

Enroulement.

En 1887, Douvillé reprend cette question du point de vue de l'enroulement des crochets (10). Le groupe de Rudistes fixés par la valve gauche (β) a une coquille enroulée en sens contraire des Exogyres, c'est-à-dire dans le sens inverse de celui des aiguilles d'une montre (le sens de l'enroulement étudié est celui de la valve libre), c'est donc un enroulement sénestrogyre, or ce sont les formes normales (fig. 3). Un deuxième groupe fixé par la

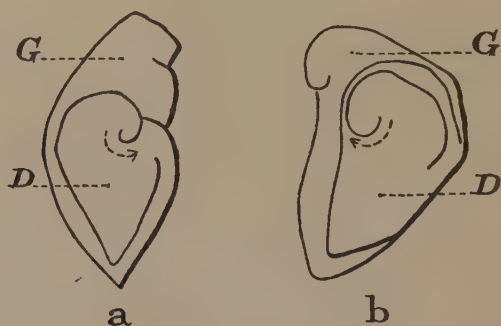


FIG. 3. — a, *Requienia Pellati*; b, *Exogyra virgula*;
D, valve droite; G, valve gauche fixée.

Le sens de l'enroulement du crochet est indiqué par une flèche.

valve droite (à l'exception des *Diceras* s. str.) a les crochets qui s'enroulent à la manière des Exogyres, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre (enroulement dextrogyre), la charnière de la valve droite fixée « est exactement constituée comme celle de la valve gauche du premier groupe » ce sont des formes inverses. Ces observations permettent de distinguer facilement, par un simple examen de l'enroulement des crochets de la valve libre, les coquilles normales des coquilles inverses.

L'inversion chez les Rudistes peut être ainsi définie en considérant trois caractères différents: le mode de fixation, la constitution de la charnière, le sens de l'enroulement des crochets. Le tableau suivant indique à quelle série normale ou inverse correspondent les diverses modalités que peuvent revêtir ces caractères.

Fixation	{ valve gauche fixée,	{ série
	{ valve droite libre, α (par définition),	
	{ valve gauche libre, α (par définition),	
	{ valve droite fixée	
		{ normale
		{ série
		{ inverse

Charnière	{	valve droite, deux dents	{	série normale
		valve gauche, une dent		
	{	valve droite, une dent	{	série inverse
		valve gauche, deux dents		
Enroulement (valve libre)	{	sens contraire des Exogyres	{	série normale
		sénestrogyre		
	{	même sens que les Exogyres	{	série inverse
		dextrogyre		

A. Morley Davies (7) met en doute l'inversion chez les Rudistes : alors qu'il pouvait sembler normal de retrouver chez les Rudistes la même inversion que chez les *Chama* quand on considérerait ces deux groupes comme apparentés, cela devient impossible puisque Rudistes et *Chama* sont deux phylums parallèles. Quant à la transition qui, selon Bernard, Douvillé, Paquier, relierait *Diceras*, *Heterodiceras* et *Valletia* « ce serait une inversion apparente seulement car une véritable inversion ne peut se faire que brusquement sans transition. L'expression « formes inverses » pour les Rudistes qui se fixent par la valve gauche est donc inexacte et il faudra rayer cette famille de la liste des Lamellibranches qui peuvent avoir une charnière inverse y laissant seulement les Astartidés et les Chamidés ».

Valletia n'est pas en effet la forme inverse de *Diceras*¹.

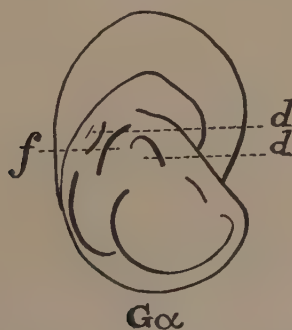


FIG. 4. — Valve gauche de *Valletia*; d, dent; f, fossette.

1. C'est Munier-Chalmas qui écrit que les *Valletia* sont sénestres par rapport aux *Diceras* (18) « pour faciliter cette comparaison, que l'on se représente les valves de *Valletia Tombecki* avec leurs caractères renversés, c'est-à-dire disposés dans un ordre inverse de ce qu'ils sont naturellement. Après avoir ramené ainsi ce genre au type dextre, on pourra constater que la disposition des dents cardinales et des muscles adducteurs rend la différence très évidente ».

Une valve droite de *Diceras* a deux dents séparées par une fossette, la dent postérieure est très développée, l'antérieure à peine saillante (fig. 2). Une valve gauche de *Valletia* a deux dents séparées par une fossette (c'est une forme inverse).

Les Rudistes fixés par la valve gauche ne sont pas sénestres aussi la première partie de la conclusion précédente est-elle tout à fait exacte, mais l'auteur oublie tous les Rudistes fixés par la valve droite qui constituent seuls (à l'exception des *Diceras* s. str.) la série des Rudistes inverses ainsi que je viens de l'exposer en étudiant la fixation, la charnière et l'enroulement des crochets. La fin de la conclusion de A. Morley Davies n'est donc pas à retenir dans l'état actuel de nos connaissances et jusqu'à présent on peut dire qu'il y a bien des Rudistes inverses.

L'inversion chez les autres Lamellibranches.

Les Lamellibranches inverses existent dans plusieurs familles. Il semble bien que la connaissance de ces formes soit due au hasard : dans un lot de coquilles étudiées, il peut y avoir des échantillons inverses, le plus souvent l'auteur ne les signale pas et le cas demeure inconnu. Une famille peut comporter des genres inverses et d'autres normaux (certains genres sont même considérés comme la forme inverse d'autres genres). Dans un genre, certaines espèces sont normales, d'autres inverses, enfin une espèce comporte parfois des individus dextres et sénestres. Il y a ainsi plusieurs cas d'inversion : cas générique, spécifique, individuel et des cas intermédiaires entre les deux derniers tels que celui des espèces amphidromes. L'inversion est considérée à tort¹ par certains paléontologistes comme un caractère suffisamment important pour être pris comme trait générique ou spécifique, les formes inverses constituent alors des types de genres ou d'espèces nouvelles.

Voici à titre indicatif les principaux cas d'inversion connus en dehors de la famille des Rudistes. Chavan (34) signale que *Chattonia* et *Crassinella* sont deux genres inverses l'un de l'autre : le premier étant la forme normale, la deuxième la forme inverse. *Miodomeris* et *Cuna* sont dans le même cas. *Unio sinuatus* REYNIÈS est une espèce à spire dextre devenue sénestre. *Unio ligamentinus* a un spécimen dont la dentition semble être complè-

La dent antérieure est très développée, la postérieure est faible. La valve droite de *Diceras* et la valve gauche de *Valletia* sont bien construites sur le même plan, mais dire que *Valletia* est la forme inverse de *Diceras*, revient à dire que la valve gauche de *Valletia* est symétrique de la valve droite de *Diceras*. Ce n'est pas exact puisque la dent la plus développée est la postérieure chez *Diceras* et l'antérieure chez *Valletia* (fig. 4). La conclusion est que si *Diceras* et *Valletia* sont l'un une forme normale, l'autre une forme inverse, le deuxième genre n'est pas l'inverse du premier.

1. Pelseneer, *loc. cit.*, partage cet avis que l'inversion ne constitue pas à elle seule une différence spécifique.

tement inversée (17) ; une valve gauche d'*Astarte corrugata* a une charnière véritablement transposée (23) ; une valve gauche d'*Astarte mutabilis* du Pliocène de Suffolk montre un cas de transposition¹ partielle, les cardinales et latérales antérieures sont transposées, les latérales postérieures normales (22). Une valve gauche de *Venericardia hornii* a une charnière transposée (15) ; dans l'espèce *Venericardia planiscosta*, certains échantillons sont inversés (14, 3) de même chez *Glans Rutoti* une valve droite a la charnière d'une valve gauche. Fischer signale une *Tellina plicata* dont les valves étaient transposées : le rostre au lieu d'être incliné à droite l'était à gauche et la valve droite au lieu d'être carénée était munie du sillon caractéristique de la valve gauche ; il n'est pas fait mention de la charnière si bien que ce cas est mal connu (12). J'ai étudié récemment un Spondyle inverse du Crétacé des Charentes (8). Pelseneer (20) signale d'autres cas individuels d'inversion sans d'ailleurs donner aucune précision à leur sujet : *Unio complanatus* SOLANDER, *Unio rubiginosus* LEA, *Unio cahawlsensis* LEA, *Astarte compressa* L., *Astarte triangularis* MONTAGU, *Astarte basteroti*, *Astarte sulcata*, *Lucina childreni*, *Pisidium scholtzi* et *Pisidium steinbruchi*. Je n'ai pas eu en mains ces échantillons ; par contre MM. L. et J. Morellet ont eu l'amabilité de me communiquer quelques beaux spécimens de Lamellibranches inverses provenant de leurs riches collections, ce sont *Pteromeris decussata* LAMARCK du Lutétien de Montainville, *P. onerata* DESHAYES, *P. (Eomiodon) Houdasi* COSSMANN et *Venericardia serrulata* DESHAYES de Bois-Gouët, *Cardita subrectangularis* L. et J. MORELLET de Campbon (La Close), *Meretrix* sp.

Je m'en rapporterai pour ce qui va suivre au travail de Popenoe et Findlay. Il comporte un certain nombre de considérations générales qu'il n'est peut-être pas inutile de résumer ici. L'inversion peut n'atteindre, ainsi que le montre *Astarte mutabilis* citée précédemment, que quelques éléments de la charnière. Les deux auteurs définissent quatre groupes selon la place occupée par les éléments inversés dans le plateau cardinal et citent pour chacun quelques exemples :

1° cardinales et latérales antérieures transposées, latérales postérieures normales : Astartidés, Carditidés (*Venericardia parva* LEA, *V. granulata* Sow., *V. ventricosa* GOULD ;

1. Popenoe et Findlay font remarquer que les termes « inversés, renversés, transposés », ont été utilisés dans la littérature pour désigner les Lamellibranches dont les valves montrent en partie ou en totalité, les caractères morphologiques de la valve opposée.

2° cardinales et latérales antérieures transposées, latérales postérieures absentes : c'est un cas particulier du groupe 1 (*Transenella stimpsoni* DALL) ;

3° cardinales et latérales antérieures normales, latérales postérieures transposées (*Venericardia parva* LEA) ;

4° cardinales normales, latérales antérieures absentes, latérales postérieures transposées : c'est un cas particulier du groupe 3 (*Unio japonensis* LEA).

II. PROBLÈMES POSÉS PAR L'ÉTUDE DE L'INVERSION.

L'inversion chez les Lamellibranches pose un certain nombre de problèmes dont l'un des plus importants a trait à la nomenclature des dents.

Nomenclature des dents chez les formes inverses.

Le phénomène d'inversion étant caractérisé par le fait que la valve gauche d'un individu inverse est symétrique de la valve droite d'un individu normal et vice-versa, les dents qui, dans une forme normale se trouvent à droite, seront à gauche dans une forme inverse et réciproquement. Or quand on numérote les éléments de la charnière d'un Lamellibranche, on désigne, à la suite de F. Bernard, les dents de la valve gauche par des chiffres pairs, celles de la valve droite par des chiffres impairs. Dans le cas des formes inverses, quelle nomenclature doit-on appliquer ? Désignera-t-on les dents d'une valve gauche inverse par des chiffres pairs, ou puisqu'elle montre les éléments d'une valve droite, par des chiffres impairs ? Les deux solutions ont eu leur défenseur.

F. Bernard maintient sa nomenclature dans le cas des formes inverses ; il écrit en effet : (2) « il est clair que pris dans son ensemble le type de charnière de chaque valve dans une forme inverse, apparaît comme rigoureusement symétrique de celui de la valve opposée dans une forme normale... La valve α est celle qui, dans notre notation, a la dent ventrale (1 ou 2) qu'elle soit droite ou gauche. Or nous avons admis jusqu'ici que chaque dent a son individualité et nous n'avons pas vu de cas de transfert d'une valve à l'autre ».

A. Morley Davies défend l'opinion opposée (7) « Les paléontologistes français (F. Bernard et Munier-Chalmas) ne semblent pas s'être aperçu que dans les charnières inverses — puisque tout ce

qui est normalement à droite se trouve à gauche et vice-versa — les numéros impairs doivent s'appliquer aux dents de la valve gauche et les numéros pairs à celles de la valve droite ».

Au premier abord l'opinion de A. Morley Davies paraît tout à fait logique ; en réalité elle ne résiste pas à un examen tant soit peu approfondi. Ce qui importe quand on étudie la charnière des Lamellibranches inverses, c'est de bien mettre en évidence le fait que, quand l'inversion est totale, la valve droite de l'individu normal et la valve gauche de l'individu sénestre ont la même charnière composée des mêmes éléments. Appliquer à la valve gauche d'une coquille inverse la même nomenclature qu'à la valve droite d'un individu normal revient à attribuer aux dents de l'une et l'autre valve la même origine, c'est-à-dire que ces dents se seraient formées à partir de la même lamelle primitive située dans le cas normal sur la valve droite et dans le cas inverse sur la valve gauche. Or, on ne sait pas comment se développe une charnière inverse et F. Bernard qui seul a suivi l'évolution des lames ou tubercules primitifs au cours de la croissance de la coquille jusqu'à la constitution de la charnière adulte admet, ainsi qu'on l'a vu, que « chaque dent a son individualité et qu'il n'y a pas de cas de transfert d'une valve à l'autre ». L'autorité de F. Bernard en cette matière est suffisante pour que l'on continue à utiliser pour les coquilles inverses la notation habituelle : paire pour la valve gauche, impaire pour la valve droite. Dans les cas d'inversion partielle, il faudrait selon Davies employer une notation mixte : sur la valve droite chiffres pairs pour les éléments inversés, impairs pour les éléments normaux. Là encore, un tel procédé supposerait que les dents inversées ont une origine définie que l'on est loin de connaître. La solution proposée par A. Morley Davies ne simplifie donc pas l'expression des formules dentaires des charnières inverses : en attribuant aux dents de la coquille sénestre une origine que l'on ignore, elle risque même d'être fortement erronée.

L'inversion est-elle un cas tératologique ?

Les coquilles inverses présentant des caractères anormaux, il est naturel de se demander si l'inversion est un cas tératologique. Ce problème a été abordé par très peu d'auteurs et aucune solution positive ne se dégage de leurs travaux. Fischer (12), Dautzenberg (6) emploient respectivement les termes « monstruosités » et « cas tératologiques », mais ils ne justifient pas ces appellations. Popenoe et Findlay (21) considèrent l'inversion comme une ano-

malie systématique et non pas comme un cas pathologique car les transpositions se font par groupes correspondant aux lamelles primitives (cette assertion ne paraît pas être rigoureuse).

Quand il s'agit de cas individuels d'inversion, les coquilles sénestres sont des « monstres » au sens précis du terme qui désigne, chez les animaux, « tout individu qui s'écarte en tout ou en partie de la structure ou de la conformation naturelle à son espèce ». On peut même dire que ce sont des monstres hétérotaxes tels que I. Geoffroy Saint-Hilaire les définit dans son traité de tératologie, c'est-à-dire « des anomalies complexes intervertissant la disposition de plusieurs organes, sans toutefois entraver l'exercice d'aucune fonction » puisque une coquille inverse présente une interversion des caractères de la charnière et qu'elle atteint la même taille que les coquilles normales ce qui indique que le phénomène d'inversion n'est pas une gêne pour la croissance de l'animal. Dès que l'inversion est spécifique ou générique, la dénomination de « monstre » n'est plus exacte puisqu'il y a hérédité du caractère ¹. Ce problème de l'inversion considéré comme un cas tératologique est en effet intimement lié à celui de l'inversion envisagée du point de vue mutationniste (28).

L'observation des faits montre que l'inversion se manifeste brusquement dans une population composée d'individus dextres, sur des spécimens isolés, sans que le caractère soit héréditaire : ce serait alors une *fluctuation*. Il y a d'ailleurs des modalités dans l'inversion quand elle se présente sous forme de cas individuels ; les coquilles appartenant à l'espèce *Venericardia parva* par exemple ont, soit cardinales et latérales antérieures transposées, soit latérales postérieures transposées.

D'autres fois la modification subie par la coquille est héréditaire, c'est une *mutation*. On peut ainsi étendre les conclusions de Pelseneer (20) en disant que, quand l'inversion est spécifique ou générique c'est un caractère fixé dans le patrimoine héréditaire de l'espèce ou du genre (mutation) ; quand elle est individuelle, elle présente tous les caractères d'un cas tératologique ; du point de vue hérédité ce serait une *fluctuation*. Le phénomène d'inversion chez les Lamellibranches participerait ainsi de la mutation et de la fluctuation, du cas tératologique et de l'anomalie systématique.

1. FISCHER P. Manuel de Conchyliologie, Paris, 1895, p. 109, distingue la sinistrorsité monstrueuse de la sinistrorsité normale qui est caractéristique de genres ou espèces.

BIBLIOGRAPHIE

1. BERNARD F. Éléments de Paléontologie. Paris, 1895, p. 502.
2. BERNARD F. Sur le développement et la morphologie de la coquille chez les Lamellibranches. *B. S. G. F.* (3), t. XXV, 1897, p. 559-566.
3. CHAVAN A. Les Carditidés du calcaire de Mons. *Bull. Mus. royal Hist. Nat. Bruxelles*, t. XII, n° 39, 1936, p. 12-13.
4. CHAVAN A. Sur quelques Crassatellidés tertiaires : *Chattonia*, *Crassatina*, *Crassinella*. *Bull. Mus. royal Hist. Nat. Bruxelles*, t. XV, n°s 3-4, 1939, p. 2-7.
5. DALL. Synopsis of the family Astartidæ with a review of the american species. *Proc. U. S. Nat. Museum*, v. XXVI, n° 1343, p. 933-951.
6. DAUTZENBERG P. Sur quelques cas tératologiques. *Journ. Conchyl.*, Paris, t. LVII, 1909, p. 39.
7. DAVIES A. M. L'inversion de la charnière chez les Lamellibranches, *C. R. somm. S. Géol. Fr.*, Paris, 1925, p. 156-158.
8. DECHASEAUX C. Un spondyle inverse. *Journ. Conchyl.*, Paris, t. LXXXV, 1942, p. 84-87.
9. DOUVILLÉ H. Essai sur la morphologie des Rudistes. *B. S. G. F.* (3), t. XIV, 1885-1886, p. 389-404.
10. DOUVILLÉ H. Sur quelques formes peu connues de la famille des Chamidés. *B. S. G. F.* (3), t. XV, 1887, p. 756-802.
11. DOUVILLÉ H. Les Rudistes et leur évolution. *B. S. G. F.* (5), t. V, 1935, p. 319-358.
12. FISCHER P. Monstruosité sénestre d'une Telline. *Journ. Conchyl.*, Paris, t. XXVIII, 1880, p. 234.
13. FISCHER P. Manuel de Conchyliologie, Paris, 1887.
14. GARDNER J., BOWLES E. An inverted hinge in a left valve of the *Venericardia planicosta* group. *Soc. Econ. Paleont. Miner.*, Oklahoma, 1932.
15. HANNA M. A. Notes on the genus *Venericardia* from the Eocene of the west Coast of North America. *Univ. of Calif. Publ., Bull. Dept. Geol. Sci.*, t. XV, p. 281-306.
16. LAMY E. Révision des Chama vivants du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris. *Journ. Conchyl.*, Paris, t. LXXI, 1927, p. 293.
17. MOQUIN-TANDON. Histoire naturelle des Mollusques terrestres et fluviatiles de France, t. I, 1855.
18. MUNIER-CHALMAS. Études critiques sur les Rudistes. *B. S. G. F.* (3), t. X, 1881-1882, p. 472-494.
19. NILS ODHNER. Res. Mjöberg's Swed. Exp. Australia. *K. Svenska Vetensk. Handl.*, t. LII, 1917, p. 28.
20. PELSENEER P. L'inversion chez les Mollusques au point de vue de la variation et de l'hérédité. *Bull. scient. France, Belgique*, Paris, t. XLVIII, 1914-1920, p. 351.
21. POPENOE W. P., FINDLAY W. A. Transposed hinge structures in Lamellibranchs. *Trans. of the San Diego Soc. Nat. Hist.*, v. VII, n° 26, 1933, p. 299-318.

22. REYNELL A. On *Astarte mutabilis* with reversed hinge dentition. *Proc. Malac. Soc. London*, v. VIII, 1908-1909, p. 4-5.
 23. VENT VON. Ueber die Bildung und Entwicklung des Bivalven Schlosses. *Verhandlung des Siebenburger Vereins für Naturwissenschaft*. Bd. 48, p. 25-150.
-

DE QUELQUES MANIÈRES D'ÊTRE DES CALCISPÈRES

PAR le Père H. Derville ¹.

Planche VII.

Certains sédiments du Calcaire carbonifère de l'Avesnois sont bourrés de balles sphériques (Calcisphères de Williamson) qui nous sont déjà connues par les sédiments du Calcaire carbonifère de l'Angleterre, de la Belgique, et du Boulonnais, mais sur lesquelles il n'est pas sans intérêt de revenir. De ces Calcisphères, la plus répandue est celle du type Granulosphère ²; elle est nettement caractérisée par sa couche corticale. Celle-ci, épaisse et de calcaire granuleux, limite vers l'extérieur une zone centrale claire, hyaline, constituée, pour l'ordinaire, par un seul individu de calcite (Cf. pl. VII, fig. 1).

A. DIMENSIONS.

On pourra constater, par le tableau ci-joint, que la taille de ces Granulosphères varie beaucoup et peut aller, en dimension diamétrale totale, de 36 à 200 millièmes de mm. La mesure minima signalée de 36 millièmes de mm. paraît cependant être exceptionnelle, comme du reste celle de 200 millièmes de mm. Le tableau ci-joint donne une idée des dimensions relatives de la zone centrale, de la couche corticale et du diamètre total. La légère majoration du chiffre du diamètre total est occasionnée par la troisième décimale.

	COUCHE	ZONE	DIAMÈTRE	
	CORTICALE	CENTRALE	TOTAL	OBSERVATIONS
1.	5,60	25,00	36,00	millièmes de mm.
2.	11,40	22,40	44,50	
3.	8,25	39,50	56,00	

1. Note présentée à la séance du 15 décembre 1941.

Cette note a été revue et mise au point au Laboratoire d'évolution des êtres organisés sous la direction de M. G. Deflandre à qui je tiens à dire ici toute ma reconnaissance.

2. J. DE LAPPARENT. Leçons de Pétrographie. Paris, Masson, 1923, p. 269. — Ce sont les Calcisphères typiques de M. Cayeux; cf. L. CAYEUX. Les Calcisphères typiques sont des Algues siphonnées. *CR. Ac. Sc.*, séance du 25 février 1929, t. 188, pp. 594 à 597.

	COUCHE CORTICALE	ZONE CENTRALE	DIAMÈTRE TOTAL	OBSERVATIONS
4.	11,40	39,50	60,80	
5.	16,70	30,80	63,10	
6.	11,40	58,80	81,00	
7.	22,40	39,50	82,00	
8.	22,40	44,50	89,00	
9.	19,50	50,40	89,00	2 zones concentriques discontinues
10.	25,00	50,40	101,00	2 zones concentriques
11.	19,50	60,80	102,50	
12.	28,00	56,00	112,00	3 anneaux complètement séparés
13.	28,00	60,80	117,00	3 zones concentriques
14.	28,00	60,80	117,00	3 zones concentriques
15.	26,50	72,40	127,00	2 zones concentriques
16.	28,00	79,40	129,00	2 zones concentriques
17.	39,50	75,80	153,00	3 anneaux complètement séparés
18.	30,80	112,66	173,00	

On pourra utilement rapprocher et comparer les individus 1 et 2 — 2,4 et 6 — 3,4 et 7, etc. On comprendra que les dimensions relatives des parties constituantes puissent, dans une large mesure, varier avec la direction de la section; une coupe diamétrale, par exemple, donnera le maximum de valeur à la zone centrale hyaline et le minimum à la couche corticale — une coupe tangentielle, par contre, donnera une balle sphérique de calcaire granuleux avec une petite tache claire au milieu et, à l'extrême, une masse sphérique homogène et toute entière de calcaire granuleux.

B. STRUCTURE ET TEXTURE DE LA COUCHE CORTICALE.

1. Structure homogène, texture granuleuse (cf. pl. VII, fig. 1).

Dans la grande majorité des cas, l'aspect est celui d'une balle sphérique homogène à couche corticale épaisse et de calcaire granuleux.

2. Canalicules radiaires.

a) *en milieu calcaire* (cf. pl. VII, fig. 3).

La couche corticale se montre, dans certains cas, parcourue par des canalicules radiaires, rectilignes, très fins, qui la tra-

versent de part en part et semblent mettre en communication la zone centrale hyaline avec le milieu extérieur. Ces canalicules sont si ténus qu'ils doivent, normalement, passer inaperçus ; ils ne sont en effet visibles qu'à la faveur de fines granulations noires de nature organique qui les obstruent et soulignent leur trajet. Cette coloration naturelle par les matières organiques est purement fortuite et fonction d'un milieu spécial dans lequel les balles ont sédimenté.

b) *en milieu siliceux* (cf. pl. VII, fig. 2).

En milieu siliceux (qui est en même temps un milieu chargé de matières organiques), les Granulosphères se comportent différemment. Leurs caractères structuraux sont pour ainsi dire inversés : le centre, de blanc et d'hyalin qu'il est normalement, est devenu jaune brun, il est marqué de taches brunes et chargé de petites granulations foncées ; la couche corticale de noire et de granuleuse est devenue gris clair et a pris l'aspect hyalin.

En lumière polarisée, la portion centrale reste obscure et ne réagit guère, la silice cryptocristalline ou de fine mosaïque étant masquée par les matières organiques ; la portion corticale est en calcédoine et de structure en mosaïque. La silice, en se substituant au calcaire, a fait disparaître le calcaire granuleux ; seul, le trajet des fins canalicules qui traversent de part en part la couche corticale est parfois conservé sous forme de fins granules de nature organique et d'un brun rougeâtre qui sont disposés en files radiales.

Il faut ajouter que ces canalicules radiaires, qui sont rares, exceptionnels dans les sédiments calcaires même chargés de matières organiques, sont au contraire fréquemment conservés dans les calcaires où la silice s'est substituée au carbonate.

3. *Structure concentrique* (cf. pl. VII, fig. 4).

La forme que je décris ici est une forme de grande taille qui mesure en diamètre total 117 millièmes de mm ; sur ces 117, la couche corticale et le centre de calcite hyaline entrent, la première pour 28 et le second pour 60,8.

La couche corticale qui, jusqu'à présent, s'était montrée homogène et de texture uniformément granuleuse, se décompose ici dans son épaisseur en deux zones concentriques. Ces deux zones, d'épaisseur à peu près équivalente (13,8), diffèrent passablement d'aspect : l'intérieure, de teinte plus claire, paraît être

de calcite hyaline, saupoudrée et masquée par des granules calcaires; l'extérieure, plus sombre, est de texture très fine qui paraît exclusivement granuleuse.

Au fait, la structure est parfois encore plus complexe, et, dans certains cas, la zone concentrique externe est marquée d'une ligne ombrée noire qui la divise à son tour en deux zones concentriques d'une épaisseur grossièrement équivalente qui est donc de moitié plus faible que celle de la zone concentrique interne.

Ces zones concentriques sont au nombre de deux ou trois et; fait qui me paraît devoir être retenu, la zone concentrique la plus interne est toujours plus épaisse que les autres (ordinairement double en épaisseur). Je citerai comme exemple la forme décrite, sous le n° 10 (cf. tableau) et qui mesure en diamètre total 101 millièmes de mm. Sa couche corticale qui compte en épaisseur 25 millièmes de mm se décompose en deux zones concentriques dont l'interne est de 16,7 millièmes de mm et l'externe de 8,25 millièmes de mm. Ces deux zones sont de texture granuleuse et ne diffèrent en rien par l'aspect.

4. Structure quadrillée ou réticulaire (cf. pl. VII, fig. 4).

Dans certains individus, des ombres, assez imprécises d'ailleurs, recourent en direction radiale ces deux zones externes et, comme elles se correspondent de l'une à l'autre, elles leur confèrent un aspect quadrillé. D'autre part, comme cet aspect particulier caractérise parfois toute la couche corticale, je suis autorisé à admettre que, bien qu'elles ne se voient pas toujours, les partitions radiales des deux zones externes s'étendent à la zone interne.

Il faut ajouter du reste que, dans les cas où il se produit une pigmentation par les matières organiques, cette pigmentation n'est pas nécessairement uniforme. Les pigments ponctuent ou empâtent plus ou moins violemment certaines portions des lignes concentriques sombres qui séparent les zones et certaines portions des lignes radiales qui les recourent. La couche corticale prend alors en certains points une structure réticulaire à mailles plus ou moins régulières.

5. Structure en anneaux concentriques (cf. pl. VII, fig. 5).

Dans les calcaires oolithiques à *Productus sublaevis*, j'ai rencontré quelques balles sphériques qui rappellent étrangement

les formes à structure concentrique. La couche corticale y est sombre et de calcaire apparemment granuleux ; elle s'est résolue en trois anneaux nettement individualisés et séparés l'un de l'autre par un petit liseré de calcite hyaline de remplissage. La zone centrale diffère elle aussi : elle est de texture prismatique et donne une croix noire entre nicols croisés.

L'individualisation des trois anneaux résulterait d'un phénomène de contraction qui aurait provoqué le décollement des zones et leur individualisation sous forme d'anneaux distincts. Elle confirme et accentue l'existence des zones dont j'ai parlé plus haut et qui, pour l'ordinaire, n'ont pas la netteté qu'on leur souhaiterait.

C. INTERPRÉTATION DES DIFFÉRENTES STRUCTURES.

1. Balles granuleuses homogènes et balles à canalicules radiaires.

Il y a lieu, je pense, de rapprocher les balles sphériques à coque épaisse homogène et granuleuse et celles dont la couche corticale est parcourue de part en part par de fins canalicules radiaires.

Il me paraît vraisemblable que ces canalicules existent chez les unes comme chez les autres mais qu'ils ont été périmés, chez les premières par la fossilisation, mis en évidence et accentués chez les secondes par des phénomènes purement accidentels et fortuits.

Les canalicules ne s'observent pas dans les calcaires normaux, ils sont masqués par les éléments très tenus du calcaire granuleux qui réfléchissent la lumière et ne la transmettent pas. C'est pour cette raison que le calcaire granuleux, qui est noir en lame mince, se présente en taches d'un blanc laiteux sur le marbre poli. Dans les calcaires riches en matières organiques, ces canalicules s'ébauchent sous forme de traînées linéaires foncées grâce aux pigments organiques qui soulignent leur trajet. Dans les accidents siliceux où la silice s'est substituée au carbonate de calcium originel (accidents qui sont en même temps très chargés de matières organiques), les canalicules sont rarement absents ; ils sont parfois remarquablement nets (cf. pl. VII, fig. 2).

Ne peut-on légitimement en conclure qu'ils existent mais qu'ils sont périmés ou mis en valeur suivant les circonstances mêmes de la fossilisation.

Comme je l'ai signalé dans mon travail sur le Boulonnais ¹ et observé ici à nouveau, ces canalicules « étudiés en place dans la

1. H. DERVILLE. Les marbres du Calcaire carbonifère en Bas-Boulonnais (Thèse de doctorat). Strasbourg, Boehm, 1931, p. 133 par. 3 et pl. XVIII.

roche elle-même », et en lumière réfléchie, « semblent se terminer à la surface interne de la couche corticale par une petite tache papilliforme et à sa surface externe, par un petit renfoncement en entonnoir qui ne s'observe que rarement, les conditions d'observation se présentant au mieux ». Ces dépressions en entonnoir sont parfois assez accentuées pour que la balle sphérique présente, vue de profil, une surface extérieure nettement mamelonnée ou moruliforme.

Quoi qu'il en soit de ces détails, accessoires à coup sûr, un fait est indubitable c'est qu'ils sont creux, condition *sine qua non* pour que les matières organiques aient pu les colorer à l'exclusion du reste. Leur rôle est de faire communiquer le centre de la sphère avec le milieu extérieur; au centre était la masse plasmique d'où s'échappaient, selon toute vraisemblance, des filaments cytoplasmiques extrêmement ténus qui, enfilant les canalicules radiaires, pouvaient gagner la surface extérieure de la sphère et s'y épanouir.

2. Structures concentrique, réticulaire et en anneaux individualisés.

Je rapprocherai les unes des autres et grouperai les structures concentrique, réticulaire et la structure « en anneaux individualisés ».

A vrai dire, il ne faudrait parler que de structure réticulaire, les structures concentrique (et radiaire dont je n'ai pas parlé) étant des ébauches, des aspects incomplets de la structure réticulaire, résultant d'une coloration élective par les pigments organiques — la structure en anneaux individualisés étant, par ailleurs, selon moi, secondaire et purement accidentelle.

La structure réticulaire s'observe seulement dans quelques cas particulièrement favorables; elle me paraît cellulaire. Les éléments cellulaires, de forme rectangulaire, serrés les uns contre les autres, constitueraient, par leurs parois parallèles à la surface, les lignes sombres concentriques qui délimitent les zones (ou anneaux) et, par leurs parois radiales, les trainées sombres rayonnantes qui les recoupent. Je n'ai pratiquement observé ces détails qu'à titre exceptionnel et sur des formes toutes de grande taille mesurant, par exemple, en diamètre total 89, 101, 117, 127, 129 millièmes de mm et à couche corticale épaisse, mesurant respectivement 19,5, 23, 28, 26,50, 28 millièmes de mm. Une ligne sombre, incomplète, divisant en deux dans son épaisseur une portion de la couche corticale, a bien été observée par moi dans une petite forme de 28 millièmes de mm à couche corticale mince de 3,90 millièmes de mm. Mais ce détail structural étant trop imprécis (et du reste exceptionnel chez une aussi petite forme), je pense qu'il vaut mieux, pour l'instant, me contenter de le signaler sans chercher à en tirer argument. Il s'agirait, en tout cas, d'une forme à une seule couche cellulaire.

On peut donc envisager ce type de Calcsphère comme un petit plasmode, un petit thalle végétal de forme sphérique, comme une balle creuse recouverte d'une assise de cellules rectangulaires. Cette assise, par

l'accroissement de ses éléments sur leurs faces latérale et distale, et par des divisions parallèles à la surface extérieure du thalle, donnerait les zones concentriques que j'ai décrites plus haut. On ne s'étonnera plus dès lors de trouver, chez certains individus de *Granulosphæra* à trois zones concentriques, la zone interne double en épaisseur des deux autres. Les éléments de l'assise initiale du thalle (zone concentrique interne), après s'être accrus, se sont divisés tangentiellement à la surface donnant la seconde zone concentrique. Cette zone, à son tour, s'est épaissie, puis s'est divisée par son milieu, donnant ainsi deux nouvelles zones (zone concentrique n° 2 et zone externe), moitié moindres en épaisseur que la zone interne. En supposant que ce processus continue, ces deux zones vont s'accroître et la zone externe se divisera à son tour, etc. En fait, je n'ai jamais observé plus de trois zones concentriques.

3. J'ai pleine conscience des objections que l'on peut me faire touchant les conditions mêmes de fossilisation — la séparation d'organismes qui pourraient paraître à d'autres sinon identiques, à tout le moins voisins — l'interprétation des traînées radiales et concentriques etc. J'y répondrai d'un mot.

De tous les caractères structuraux, le seul qui soit indiscutable, c'est le canalicule radiaire ; encore le devons-nous au hasard d'une imprégnation du sédiment calcaire par les matières organiques, imprégnation qui fut suivie ou non d'une silicification du sédiment. Que deviendraient ces canalicules radiaires dans le cas des structures réticulaire ou en anneaux individualisés, et comment interpréter les bandes sombres concentriques ?

Ces bandes et ces zones concentriques, par ailleurs, sont beaucoup trop régulières pour qu'on tente de les expliquer par de simples phénomènes de recristallisation. Et, si on les interprète comme résultant d'une pigmentation ou de phénomènes lumineux à la surface de cristaux de calcite, comment expliquer la régularité même de la recristallisation, sans une disposition, sans une structure préalable.

La structure en anneaux individualisés de la couche corticale, comme du reste la texture prismatique de la zone centrale qui montre, entre nicols croisés, le phénomène de la croix noire, ne sont que des manières d'être purement fortuites, exceptionnelles, et dépendantes du faciès sédimentaire. Je n'ai rencontré cette forme en anneaux que dans des calcaires de faciès oolithique.

D. CONCLUSIONS.

A titre provisoire ¹ et pour des raisons de commodité, je pro-

1. Vu les circonstances, il m'a été impossible de faire la bibliographie de la question et surtout de me reporter à la note relative aux Calcisphères de Williamson. Par ailleurs, la bibliothèque dont j'ai l'usage est réduite à rien en ce qui concerne les roches sédimentaires.

poserai, pour les formes à structure granuleuse homogène et pour celles à canalicules radiaires, le nom de *Calcisphaera* ¹ *canaliculata* nov. sp. — pour la forme à zones concentriques celui de *Calcisphaera cancellata*, WILLIAMSON — pour la forme à anneaux individualisés, celui de *Calcisphaera polyderma* nov. sp.

Calcisphaera canaliculata nov. sp.

Balle sphérique à couche corticale épaisse, de calcaire granuleux, percée de nombreux et fins canaux à orientation radiaire. La balle mesure en diamètre total de 36 à 144 millièmes de mm ; pour ces formes extrêmes, l'épaisseur de la couche corticale est respectivement de 5,6 et de 39,5 millièmes de mm.

J'ai rencontré un individu qui mesurait, en diamètre total, 200 millièmes de mm ; l'épaisseur respective de la couche corticale et de la zone centrale était de 33,4 et 130 millièmes de mm.

Je ferais de cet organisme qui représente, si j'ai bon souvenir, les Calcisphères typiques de Williamson, un Foraminifère à test perforé. C'est un organisme très commun dans le Calcaire carbonifère et que l'on rencontre surtout dans les calcaires à grain fin et à points cristallins (Calc. de Bachant) comme aussi dans les calcaires oolithiques où il constitue parfois le nucleus des éléments figurés (Calc. oolithique à *Productus sublaevis*).

Calcisphaera cancellata WILLIAMSON.

Balle sphérique à couche corticale épaisse, compartimentée à deux ou trois zones concentriques. Chez les individus rencontrés, le diamètre total varie de 101 à 173 millièmes de mm. Comme elles ont toutes au minimum deux couches, il est vraisemblable qu'il doit exister des individus de taille inférieure à 101 millièmes de mm.

Calcaire carbonifère ; dans les calcaires à grain fin et à points cristallins (Calc. de Bachant).

Calcisphaera polyderma nov. sp.

Balle sphérique à couche corticale épaisse composée de trois anneaux nettement individualisés. Je n'en ai rencontré que deux individus, tous deux de grande taille (112 et 153 millièmes de mm) et exclusivement dans des calcaires de faciès oolithique (cf. tableau nos 12 et 17 et pl. VII, fig. 5).

Oolithe à *Prod. sublaevis*.

1. *Granulospaera* serait plus parlant mais *Calcisphaera* fait priorité, cf. J. DE LAPPARENT. Leçons de Pétrographie. Paris, Masson, 1923, p. 269.

LÉGENDE DE LA PLANCHE VII

FIG. 1. — *Calcisphaera canaliculata* nov. sp.

Forme à couche corticale homogène et de calcaire granuleux. La portion centrale est hyaline et constituée par un individu de calcite.

Calcaire de Bachant : Carr. Lebrun, Bachant (Nord).

Grossiss. : 350 diam.

FIG. 2. — *Calcisphaera canaliculata*, nov. sp.

Individu provenant d'un ruban siliceux. Le sédiment et la portion centrale sont fortement pigmentées (matières organiques). La couche corticale, blanche, est de calcédoine ; on y observe le trajet des canalicules radiaires engorgés de granulations pigmentaires.

Calcaire de Bachant : Carr. Adam, Bachant (Nord).

Grossiss. : 350 diam.

FIG. 3. — *Calcisphaera canaliculata* nov. sp.

Individu pigmenté montrant bien ses canalicules radiaires. Le sédiment est entièrement calcaire mais chargé de matières organiques. L'organisme est entièrement calcaire lui aussi ; sa portion centrale est de calcite en mosaïque.

Calcaire de Bachant. Eclaires (Nord).

Grossiss. : 350 diam.

FIG. 4. — *Calcisphaera cancellata* WILLIAMSON.

L'individu montre sa couche corticale divisée en deux zones : une zone interne claire et simple — une zone externe foncée et dédoublée. La portion centrale est de calcite en mosaïque.

Cette forme rappelle étrangement la *Calcisphaera cancellata* dont M. Mylon donne, d'après Williamson, la description suivante : « paroi double ; entre les deux murailles on distingue de nombreux petits compartiments cubiques séparés par des cloisons radiales (cf. Yves MILON : Recherches sur les calcaires paléozoïques et le Briovérien de Bretagne. Rennes. Oberthur, 1928, p. 28).

Calcaire de Bachant : Carrière Adam, Bachant (Nord).

Grossiss. : 350 diam.

FIG. 5. — *Calcisphaera polyderma* nov. sp.

On voit trois zones concentriques nettement séparées sous forme d'anneaux (cercles foncés) entre lesquels de la calcite de remplissage a cristallisé sous forme de liserés blancs hyalins.

Oolithe à *Prod. sublaevis*. Baldaquin (Carr. Godin d'en bas), Avesnes (Nord).

Grossiss. : 350 diam.

OBSERVATIONS GÉOLOGIQUES SUR LES ENVIRONS DE BAYEUX

PAR **Louis Dangeard**¹.

Cette note a pour but d'apporter, grâce à des fouilles exécutées par la ville de Bayeux pour des recherches hydrologiques, quelques précisions sur la géologie d'une région où les affleurements sont particulièrement rares.

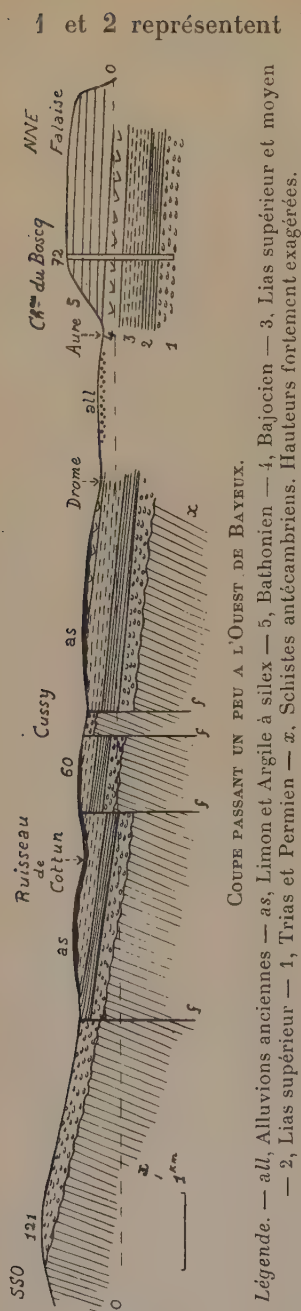
Le substratum est formé par du Permien, du Trias et du Jurassique. Le Permien et le Trias sont bien développés au Sud et au Sud-Ouest de Bayeux (exploitations d'argiles à Noron-la-Poterie, de cailloutis près de Campigny). Le Jurassique est représenté par le Lias et le Bajocien. Les affleurements du Lias, d'abord orientés Sud-Nord sur la rive droite de l'Aure, s'infléchissent brusquement à l'Ouest et sont alors dirigés parallèlement à la côte ; ils s'enfoncent sous des plateaux où l'Aalénien, partiellement décalcifié et transformé en argile à silex, tient une grande place.

1. Au Sud de Guéron, les fouilles ont permis de préciser, sur la rive gauche de l'Aure, la limite du Trias et du Sinémurien à *Gryphaca arcuata*. Cette limite passe immédiatement au Nord de la route de Monceaux, à 700 m. environ de l'endroit indiqué sur la carte. Les couches triasiques formées de galets, de graviers, de sables et d'argiles contiennent de l'eau en abondance.

2. Près de Barbeville, où se trouvent le captage actuel de Bayeux et l'usine des eaux, on a rencontré le Lias moyen et le Lias supérieur. Sur la rive droite de la Drôme, l'excavation, commencée à la cote 32,43, a traversé des argiles noires à Bélemnites et à Ammonites pyriteuses (*Amaltheus margaritatus*) alternant avec des bancs et de gros nodules calcaires. Sur la rive gauche, près de la source de Barbeville, la fouille commencée à la cote 41,62, a donné la coupe suivante :

4. Limon	0 m. 55
3. Argile à silex	5 m. 75
2. Calcaire gris-bleuté alternant avec de l'argile	1 m. 45
1. Calcaire phosphaté	0. m 45

1. Note présentée à la séance du 15 décembre 1941.



5. Limon brun, caillouteux à la base..... 1 m. 40

4. Cailloux et galets..... 0 m. 45

3. Argile..... 0 m. 40

2. Oolithe blanche..... 0 m. 40

1. Oolithe ferrugineuse..... 0 m. 35

L'« Oolithe blanche » est constituée en ce point par une accumulation de Spongiaires. L'« Oolithe

ferrugineuse » repose sur un calcaire bleu, dur, à surface perforée et irrégulièrement verdie ; elle fournit quelques venues d'eau.

4. Il y a lieu de signaler l'existence d'un lambeau de « Sables de Saint-Vigor » (Pliocène) entre Barbeville et Ranchy, au voisinage de la route de Littry.

L'étude au microscope des échantillons recueillis dans le Lias donne lieu aux remarques suivantes : les argiles du Lias moyen sont remplies de *Coccolithes* ; le calcaire phosphaté est riche en *Schizosphères* et en grains de glauconie ; le calcaire gris-bleuté qui le surmonte contient aussi de nombreuses *Schizosphères* ainsi que des *spicules d'Éponges* transformés en glauconie. J'ai retrouvé des caractères microscopiques identiques dans les calcaires à silex de la Malière provenant du littoral. On voit quel rôle important ont joué les *Schizosphères* dans les mers jurassiques normandes¹.

L'examen d'ensemble de la région, comme les résultats de ce travail, suggèrent que les couches sont affectées par de nombreux accidents (bombements, failles). C'est la conclusion formulée déjà par divers auteurs et en particulier par M. Bigot². Sur une coupe menée du Sud au Nord, depuis les affleurements triasiques d'altitude élevée jusqu'à la mer³, apparaissent diverses anomalies qui ne peuvent être expliquées par la seule inclinaison des couches. Il faut admettre l'existence d'une série de failles, analogues à celles de Barbeville signalée plus haut et dirigées WNW-ESE comme celles de la côte (champ de fractures des Hachettes). Espérons que les recherches ultérieures permettront de prolonger et de raccorder ces accidents et ceux qui ont été signalés par M. Bigot : à l'Ouest près de Trévières et de Colombières, à l'Est dans la vallée de la Seullès. Dès maintenant on peut supposer que c'est le même jeu de faille qui soulève le Trias de Cussy et qui fait apparaître une sorte de « boutonnière » de Lias inférieur dans la vallée de la Seullès.

1. G. DEFLANDRE et L. DANGEARD. *Schizosphaerella*, un nouveau microfossile méconnu du Jurassique moyen et supérieur. *CR. Ac. des Sciences*, séance du 5 déc. 1938.

2. A. BIGOT. Failles et plis dans les terrains secondaires du Calvados. *Bull. S. Linn. de Norm.* 7^e s., t. X, 1927, p. 33.

3. Renseignements dans DOLLFUS : Un forage au château du Bosq, près Port-en-Bessin (Calvados). *B. S. G. F.*, (4), t. XIII, 1913, p. 43.

CORRÉLATION STATISTIQUE, CLASSIFICATION ET HIÉRARCHIE DES FACTEURS INTERVENANT DANS LA FORMATION DES SÉDIMENTS

PAR **Louis Glangeaud**¹.

Cette note a pour but de coordonner, dans les quelques pages autorisées, plusieurs centaines d'observations publiées ou inédites et une abondante bibliographie internationale qui sera donnée ailleurs. Elle ne peut donc être qu'une introduction très condensée et assez abstraite de la « Dynamique des sédiments ». Pour cela, nous allons essayer de classer et relier, à toutes les échelles, les facteurs intervenant dans la sédimentation.

Une roche étudiée, soit à l'œil nu, soit au microscope, ne révèle au géologue que le résultat local et final d'une série d'actions complexes s'étendant dans le temps et l'espace. Le géologue a la mission, en partant de cette observation, de reconstituer l'immense trame des phénomènes anciens. Il n'est pas le seul naturaliste dans ce cas.

En effet, dans les Sciences de la nature, les résultats globaux que l'on observe proviennent de l'action statistique d'individus, en nombre généralement considérable. Le résultat final est néanmoins considéré comme unique, bien qu'il provienne de multiples actions individuelles. Le naturaliste accomplit donc instinctivement une intégration quand il s'agit de phénomènes individuels, orientés suivant une variation continue ou une opération statistique quand les phénomènes sont désordonnés et plus ou moins aléatoires. C'est cette opération intuitive que nous voulons analyser.

Pour bien poser le problème, nous allons examiner des cas progressivement compliqués :

I. PHÉNOMÈNES STATISTIQUES DANS LE CHARRIAGE DES SABLES.

Un courant de vitesse constante, en passant sur des grains de sable de diamètre sensiblement égaux, provoque à chaque instant le déplacement brusque d'un certain nombre de grains qui,

1. Note présentée à la séance du 15 décembre 1941.

après avoir accompli un trajet assez court s'arrêtent. A un instant donné, la répartition des grains de sable en mouvement et au repos est faite *au hasard*.

M. Albert Einstein ¹, grâce à des simplifications judicieuses, a pu appliquer les méthodes du calcul des probabilités à ces déplacements brusques et passer ainsi mathématiquement du mouvement incohérent des grains à l'équation du charriage *continu* des sables.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

x étant la position du grain par rapport à l'origine et t le temps écoulé.

Cette équation a été vérifiée, par expérience, dans un chenal artificiel. Dans ce cas simple, mais réel, on passe ainsi, *par le calcul*, d'un phénomène aléatoire qui est le déplacement d'un grain individuel à la mesure expérimentale d'un phénomène global qui est le débit solide.

La plupart des cas naturels étant beaucoup plus compliqués, l'analyse ne nous permet pas, pour le moment, d'établir le mode de probabilité et par suite de calculer les équations de passage.

II. PHÉNOMÈNES LITTORAUX.

Les phénomènes de charriage des sables, étudiés par A. Einstein sont de l'ordre de quelques secondes à quelques heures, pour le temps, et de quelques μ à quelques mètres pour l'espace. Dans les phénomènes littoraux, nous avons observé toute une gamme continue depuis cette petite échelle jusqu'à des échelles de plus en plus grandes dans l'espace et dans le temps.

A. Échelle locale : action des vagues et de la marée. — Le déplacement du sable ou des galets est produit, sur les plages, par une lame d'eau oscillante. Les sédiments du rivage suivant leur grosseur, sont entraînés, les uns par roulement, les autres en suspension tourbillonnaire. Ces deux mécanismes de déplacement peuvent, *dans une même région, agir en sens inverse*. J'ai pu vérifier, expérimentalement, sur la plage, au Sud de Soulac, qu'au même moment les vagues rejetaient les galets vers le rivage,

1. Albert EINSTEIN JUNIOR. *Mitt. der Versuch Anstalt für Wasserbau*, Zurich, 1937.

tandis qu'elles entraînaient les vases en suspension tourbillonnaire vers le large. Nous examinerons donc l'action des vagues et de la marée pour chaque catégorie de sédiments.

a) *Déplacement des galets*. Nous avons étudié expérimentalement¹ l'action d'une série de 25 vagues successives déferlant sur des jeux de boules calibrées.

A un moment donné, le mouvement d'un galet sur le fond dépend de sa position par rapport à ce que j'ai nommé le « point mort » point d'inversion des mouvements d'une certaine grosseur de galet, situé entre la zone de déferlement et le rivage. Suivant sa position à l'instant considéré, on pourra envisager 3 types de probabilités différentes pour un galet dont la dimension est voisine de celle correspondant au « point mort ».

1° Le galet est entre le point mort et la ligne de rivage, dans ce cas, il restera immobile à marée descendante. Par contre, la marée montante le déplacera et le rapprochera encore du rivage.

2° Le galet étant entre le point mort et la zone de déferlement des vagues; son sort est alors indéterminé. Il pourra, soit aller vers la haute mer; soit vers le rivage, soit rester dans la zone d'oscillations.

3° Le galet est entraîné au large de la zone de déferlement des vagues. Si la marée est montante, il aura peu de chance de revenir à la côte pendant la durée de la marée. Si au contraire la marée est descendante, il pourra de nouveau être repris dans la zone d'oscillations.

L'espace de temps correspondant à 25 vagues (environ 5 minutes), est suffisamment court pour que l'action de la marée soit négligeable. A cette échelle, l'action des vagues est sensiblement déterminée. Mais si l'on envisage plusieurs cycles de flot et jusant, l'action périodique de la marée devient la plus importante et l'action des vagues prend alors l'allure d'un phénomène aléatoire.

La résultante de ces deux phénomènes distincts, périodique pour la marée et aléatoire pour les vagues, est différente suivant la grosseur des galets. Pour la côte des Landes, où peut se former un cordon littoral, il y a un maximum de probabilités, pour que les galets dont la grosseur est égale ou supérieure au diamètre défini par le point mort moyen soient laissés à la limite de la haute mer par la marée descendante. Ces galets forment ainsi un cordon littoral dont la grosseur moyenne correspond à l'ordonnée moyenne du « point mort » sur la côte considérée.

1. L. GLANGEAUD. CR. Ac. Sc., t. 212, p. 146-149; 27 janvier 1941.

Les galets non stabilisés dans le cordon littoral subissent de multiples oscillations entre les limites de la haute et de la basse mer. D'autre part, l'obliquité des vagues provoque le déplacement latéral des bancs de galets qui oscillent suivant une trajectoire en dents de scie. Les bancs de galets effectuent ainsi de véritables migrations parallèles au rivage. Ils laissent derrière eux, comme témoins de leur passage, des cordons littoraux sur le bord et, sur les plages, quelques galets isolés qui constituent le *résidu de probabilité* d'entraînement latéral. Sur la plage des Landes, ce « résidu statistique » est en moyenne de 3 galets par 100 m² de sable, dans les régions où il ne reste plus de bancs ou de cordons de galets.

b) *Déplacement des vases*. Le transport des vases par les phénomènes littoraux tourbillonnaires est complètement différent du mécanisme de transport des galets par roulement. Le ressac provoque une violente turbulence dont la répartition dépend essentiellement de l'amplitude et de la direction des vagues, ainsi que de la forme de la plage. Pour des raisons complexes, que nous exposerons ailleurs, des vases déposées artificiellement sur la plage des Landes entre Arcachon et Soulac, sont entraînées vers la zone littorale où la houle du large commence à modifier sa courbure pour tendre vers le déferlement. Les vases en suspension dans cette même zone sont alors transportées grâce à l'action des courants littoraux liés à la marée. Quand la côte est sensiblement rectiligne et que l'obliquité des vagues se maintient constante, le transport se fait parallèlement à la côte. Quand il se produit une incurvation du rivage, estuaire ou baie, surtout si celle-ci est protégée des grandes vagues déferlantes du large par une île (embouchure de la Charente), le phénomène est inversé¹ et la zone de suspension tourbillonnaire des vagues atteint le rivage. La *haute teneur en vase* de l'eau permet alors des phénomènes de dépôt et de colmatage suivant des mécanismes décrits ailleurs.

On voit donc que la répartition de la vase n'est pas liée comme celle des galets à la répartition des vitesses sur le fond. Elle dépend : d'abord de la *répartition générale* de la *turbulence* et des *échanges tourbillonnaires* entre le rivage et la haute mer ; puis des phénomènes microscopiques d'attractions interfaciales intervenant dans le colmatage.

Les *sables* suivant les circonstances subiront, soit l'action du roulement sur le fond, soit l'action de la suspension tourbillonnaire.

1. L. GLANGEAUD. A. F. A. S, n° 30, avril-mars 1939, p. 329-339.

B. Équilibre dynamique et morphologique des plages sableuses. — Certaines plages comme celles des Landes, sont actuellement en équilibre, avec d'assez petites fluctuations dans les profils transversaux et longitudinaux. Le mécanisme des déplacements que nous venons d'étudier permet de comprendre comment s'établit cet équilibre. Il se produit *statistiquement* par le fait que sur *un assez grand nombre de marées*, la quantité de sable entraînée dans un sens est égale à celle qui est apportée dans l'autre sens.

Ceci est dû à une corrélation existant entre le débit solide déplacé par les vagues au cours des marées et la forme transversale de la plage. En effet, ainsi que nous l'avons observé, la distance de déferlement des vagues au rivage et leur puissance varie automatiquement au cours de la marée, sans qu'interviennent de changements atmosphériques. Ces variations sont dues à ce que la plage offre des ondulations longitudinales et transversales. L'action réciproque du ressac sur la plage et de la plage sur le ressac permet généralement la conservation d'un véritable équilibre morphologique. Toutefois une série de marées-tempêtes exceptionnelles ou au contraire d'une période prolongée de beau temps, en modifiant les effets statistiques moyens, entraînent la variation des profils de la plage. Mais, à cette fluctuation en succédera une autre en sens inverse qui fera réapparaître l'équilibre.

On peut donc comparer un tel équilibre morphologique à un *système chimique en équilibre*, équilibre qui, dans les deux cas, est un équilibre d'ordre statistique.

Pour une mer restant à un *niveau constant* et pour un moment donné, la nature et le débit des éléments en migration latérale et transversale, ainsi que les profils de la plage dépendent de nombreux facteurs décrits ailleurs.

C. Cas d'une transgression. — Dans une mer en transgression et avec marée, les résultats seront différents suivant que la transgression sera lente ou rapide.

Dans le premier cas, les sédiments pourront passer par une série d'états d'équilibre très voisins, chaque profil d'équilibre correspondant à la mer d'un niveau déterminé. On passera d'un profil au suivant, à l'occasion d'une marée exceptionnelle ou d'un raz-de-marée. Le cordon littoral aura alors beaucoup de chances d'émigrer, en suivant régulièrement la transgression et en ne laissant derrière lui qu'une faible quantité de galets résiduels. Dans un tel cas *le poudingue de transgression sera absent*

ou constitué par quelques galets abandonnés au milieu du sable ou représenté seulement par de petites lentilles de galets.

Au contraire, si la transgression est *rapide*, les profils d'équilibre n'auront pas le temps de s'établir et une partie importante des cordons de galets restera en arrière du front de transgression. Un tel phénomène paraît s'être produit pour les cordons de galets de la transgression flamandaise, laissés sur le plateau continental du golfe de Gascogne.

D. Dans le cas d'une *régression*, les cordons de galets auront plus de chances d'être laissés en arrière que dans le cas d'une transgression. *Les poudingues de régression sont donc plus fréquents que les poudingues de transgression.*

Dans le cas des mers sans marée, l'action de radeau produit par le phénomène des marées n'intervient plus et on peut ainsi expliquer la répartition désordonnée des galets dans les mers crétacées et nummulitiques de la côte algérienne.

Un autre facteur important est le profil de la côte. Sa pente modifie considérablement la dynamique des cordons en transgression.

III. CLASSIFICATION ET HIÉRARCHIE TEMPORO-SPATIALE.

Les exemples que nous venons d'étudier montrent que les modalités d'action des phénomènes intervenant dans la sédimentation dépendent de l'espace et du temps. Leur classification et leur hiérarchie sera donc temporo-spatiale. Il paraît difficile d'établir à priori dans le continu du temps et de l'espace des coupures satisfaisantes. Il existe néanmoins des *coupures naturelles* correspondant à des échelles critiques.

1° Variations spatiales actuelles. Nous parlerons d'abord du classement des phénomènes actuels dans l'espace.

A. *Classe de quelques A° à quelques mètres* (classe structurale). — Cette classe étant de l'ordre de dimension des éléments individuels formant les sédiments, les facteurs dominant seront surtout ceux propres aux éléments individuels, grains de sable, micelles colloïdaux, etc... Ils interviennent surtout dans la structure de la roche, d'où le nom de classe structurale.

On peut établir une série de sous-classes où interviennent les facteurs suivants :

a) *Sous-classe d'ordre moléculaire* : réactions chimiques, pH.

degré d'ionisation, phénomène de cristallogenèse, actions bactériennes.

b) *Sous-classe d'ordre colloïdal* : nature des colloïdes, de leur enveloppe liquide, de leur charge, etc.

c) *Sous-classe d'ordre microscopique* de $1\ \mu$ à $80\ \mu$: attractions interfaciales entre les éléments, degré de mouillabilité, etc.

d) *Sous-classe d'ordre microscopique* au-dessus de $80\ \mu$: forme et surface du grain ou du galet, frottement, rugosité.

B. *Faciès locaux* de quelques mètres à quelques centaines de mètres. A l'intérieur de cette classe, les facteurs individuels de la classe précédente interviennent d'une façon statistique comme éléments aléatoires et ils sont généralement dirigés par d'autres facteurs qui sont les phénomènes hydro-dynamiques *locaux*, la morphologie locale, etc...

C. *Faciès globaux régionaux* (de l'échelle du $1/50.000^e$ à l'échelle du $1/200.000^e$). Les faciès locaux liés aux phénomènes *locaux* de la classe inférieure peuvent, surtout dans le cas des faciès littoraux, avoir de grandes variations et une répartition plus ou moins incohérente. Aussi pour pouvoir caractériser les faciès pétrographiques à l'échelle du $1/80.000^e$ utilisée couramment par les géologues, il m'a paru nécessaire d'introduire la notion de « faciès global » qui est définie par des paramètres statistiques obtenus en partant des caractères des faciès locaux.

Par exemple, pour une côte, à une époque donnée, on mesure systématiquement la proportion locale des carbonates contenus dans de petits carrés, puis on établit alors la courbe des fréquences des carbonates. Cette courbe de fréquence, analysée par les méthodes statistiques habituelles, donne les paramètres statistiques définissant le faciès global de la région au point de vue de la teneur en carbonates.

D. *Province pétrographique* de quelques dizaines de kilomètres à quelques centaines de kilomètres (échelle du $1/200.000^e$ au $1/1.000.000^e$). En appliquant toujours des méthodes statistiques (courbes et nuages de points), l'étude des variations des faciès globaux de la classe inférieure met en évidence sur les graphiques de la province, l'influence du climat, des phénomènes océanographiques et orogéniques.

A l'intérieur de la province pétrographique, la variation géo-graphique des faciès statistiques peut se faire suivant les modes : aléatoires, périodiques ou continus. Il peut apparaître aussi des

variations brusques discontinues (points singuliers) en rapport avec des limites géographiques, biologiques ou météorologiques ¹.

2° Échelle géologique temporo-spatiale. — La nécessité d'utiliser des méthodes statistiques pour passer d'une classe de phénomènes dans la classe située au-dessus, apparaît encore plus quand on envisage la gradation des phénomènes à la fois dans l'espace et dans le temps.

Les méthodes chronologiques très fines font intervenir les notions d'*acmé d'une espèce fossile*, de l'Héméra et de la biozone stratigraphique correspondante. Or, l'acmé d'une espèce représente le résultat global de l'évolution de millions d'individus qui composent l'espèce évolutive. Cette notion d'acmé est donc par elle-même une notion statistique qui peut être traitée pour son interprétation par le calcul des probabilités, ainsi que l'ont essayé notamment Volterra et Lotka pour deux espèces antagonistes évoluant en milieu isolé. Les variations actuelles des faunes et des flores qui servent pour l'établissement des échelles chronologiques font ainsi intervenir une cascade d'échelons statistiques étudiée par les Biogéographes. Les faunizones représentant l'échelon hiérarchiquement supérieur à l'acmé, ainsi que l'étage représentant le groupement de plusieurs faunizones, constituent ainsi des notions à base statistique.

Dans les phénomènes géologiques où interviennent des unités de temps et d'espace d'assez grandes dimensions, les raisonnements précédents sont encore plus valables.

Pour employer un terme utilisé en Météorologie par MM. Wehrlé et Debedant, nous pourrions parler en Géographie et en Géologie d'*étages successifs de perturbations* se superposant à mesure que l'on s'élève dans l'échelle temporo-spatiale. Par exemple la position et le déplacement d'un galet en un point d'une plage, peut être déterminée pour une seule vague en fonction de l'amplitude et du point de déferlement de celle-ci. Mais si l'on envisage plusieurs marées successives et un grand nombre de galets, la répartition et le déplacement des galets devient alors un phénomène aléatoire parce que produit par les répétitions indépendantes d'actions plus ou moins désordonnées qu'il est devenu impossible d'analyser. A fortiori, ce déplacement instantané de galets apparaît encore plus aléatoire par rapport à une durée géologique.

Donc au-dessus d'une certaine échelle critique, un phénomène

1. Y. MILON. C. R. somm. Soc. Géol. Minér. de Bretagne, mars 1936.

donné *déterminé* à l'échelle inférieure ne se manifeste plus à l'échelle supérieure que par des *paramètres statistiques*, comme les différentes moyennes, l'écart quadratique moyen et les écarts extrêmes.

Mais sous cet aspect statistique, les facteurs de la classe inférieure peuvent néanmoins jouer un rôle dominant dans la classe supérieure. Par exemple, M. Cayeux a montré, dans de nombreuses publications, l'importance des actions bactériennes dans la formation des minerais de fer et des phosphates. Ce phénomène de l'échelle microscopique intervient par l'action statistique de millions d'individus. Il peut néanmoins jouer un rôle dominant à l'échelle locale ou même à l'échelle de la province pétrographique. Toutefois, à cette dernière échelle, il est subordonné à un ou plusieurs phénomènes dirigeants qui, pour M. Cayeux¹, correspondent à des ruptures d'équilibre et qui peuvent être dues à des modifications climatiques ou géologiques d'ordre général.

De même les attractions interfaciales (phénomènes microscopiques) jouent un rôle important dans la formation des vases, sur le bord des estuaires. Mais la sédimentation de vases est néanmoins subordonnée à l'existence d'une haute teneur de matière en suspension dans l'eau. Cette concentration anormale dépend elle-même de phénomènes hydrodynamiques qui sont des phénomènes *dirigeants*.

IV. PHYSIONOMIE ET PHYLOGÉNIE DES SÉDIMENTS.

Considérons maintenant, non pas le phénomène, mais l'objet simple ou complexe (bancs de sable, cordon littoral, vase d'estuaire). Pour les sédiments actuels, l'objet est défini par sa composition à un instant donné. Celle-ci peut-être considérée comme l'état actuel d'un système en évolution. Le sédiment consolidé ou roche représente au contraire un état d'équilibre fixé et plus ou moins modifié postérieurement à cette stabilisation. Nous allons envisager successivement le sédiment en évolution et le sédiment lapidifié.

1° *Sédiment en évolution.*

Par exemple en un point donné, à un instant zéro, la vase

1. Étant donné le nombre, la variété et l'importance des travaux de M. Cayeux sur ce sujet, nous ne pouvons en donner ici la bibliographie.

sableuse V_0 est formée d'une quantité a de minéraux Q , b de micelles colloïdaux M et c , de matières organiques O :

$$V_0 = a Q + b M + c O$$

Au bout d'un temps t la vase aura une composition V_t et l'équation d'équilibre sera

$$V_t = V_0 + (Q_1 - Q_2) + (M_1 - M_2) + (O_1 - O_2)$$

Q_1 M_1 O_1 étant les matières apportées dans la vase et Q_2 M_2 O_2 étant les matières entraînées pendant le temps t .

De même pour l'ensemble des dépôts destinés à l'échelle régionale on peut établir l'équation suivante, pour une durée t .

Apport des fleuves + apport vent + débit solide flot + débit solide jasant = dépôt pendant le temps $t \pm K$ (4).

Ces équations de sédimentation sont des équations d'équilibre statistique où interviennent des fonctions de probabilité. Les liaisons ainsi établies sont fonction du temps et il existe un facteur d'hérédité K qui tient compte du stock antérieur (bouchon vaseux).

Ces systèmes sont définis par les quantités de matière $X_1, X_2 \dots X_n$ de chacun des éléments existant dans le système, à un moment donné et par des paramètres I et E . Les paramètres intrinsèques I se rapportent à des caractères propres aux éléments du système, par exemple pour une vase à la grosseur des grains, à leur composition chimique, etc... les facteurs extrinsèques E se rapportent au contraire aux facteurs extérieurs aux éléments (par exemple pH , salinité, température, vitesse de l'eau, turbulence). En passant d'une classe temporo-spatiale à l'autre, les facteurs I et E peuvent devenir différents. Par suite quand on étudie un objet déterminé, il est nécessaire de préciser l'échelle à laquelle on opère. Parmi les facteurs intrinsèques d'un système, à une échelle donnée, l'un d'entre eux est plus important que les autres. Nous l'appellerons le *facteur dominant*. De même parmi les facteurs extrinsèques, il y en a généralement un qui joue le rôle le plus important et qui pratiquement règle l'évolution du système : c'est ce que nous nommerons le *facteur dirigeant*.

L'objet étant défini par les quantités $X_1, X_2 \dots X_n$ d'éléments intervenant à un moment donné, les variations de ce système en fonction du temps sont déterminées par la série d'équations (5).

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx^1}{dt} &= f_1 (X_1, X_2, \dots, X_n, I, E) \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dx^n}{dt} &= f_n (X_1, X_2, \dots, X_n, I, E) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

En prenant des cas assez simples, on peut arriver à déterminer l'évolution des éléments du groupe en fonction des facteurs extrinsèques et intrinsèques et préciser les associations possibles à chaque stade de l'évolution.

Quand les facteurs I. E restent à peu près constants, l'étude de ces équations montre que les *fluctuations au voisinage de l'équilibre* sont relativement de faible amplitude. Elles se distinguent des modifications de plus grande amplitude qui peuvent intervenir si on modifie brusquement les facteurs I et E (*rupture d'équilibre*). *Les fluctuations qui se produisent autour de la position d'équilibre sont à l'origine des strates, tandis que les ruptures d'équilibre produisent les bancs, ou séries monogéniques.*

Une expérience montre ce mécanisme. A l'embouchure de l'Adour, la plage sablo-graveleuse forme un cordon littoral qui domine d'environ 4 m le niveau des B. M. Creusons en arrière de ce banc une carrière de 3,50 à 4 m de profondeur. Dès que cette dépression est atteinte par la marée, elle se remplit en trois marées successives, si celles-ci sont des marées tempêtes. En taillant de nouveau dans la masse sablo-graveleuse nouvellement formée, on observe qu'elle est constituée par six à sept alternances de sable et de graviers, qui correspondent aux différences de roulement en flot et en jusant. Quand l'équilibre morphologique aura été de nouveau atteint, il ne se produira plus, à la surface du banc, que des fluctuations aléatoires atteignant au maximum quelques décimètres par marée. De tels retours à l'équilibre avec oscillations plus ou moins amples peuvent être mis en évidence dans de nombreux phénomènes naturels et ont été étudiés mathématiquement et expérimentalement par les physiciens et les biologistes.

2° Sédiment stabilisé et lapidifié.

L'examen d'un sédiment stabilisé sur le terrain peut être fait à différentes échelles. A l'échelle microscopique (à l'échelle du grain), la composition minéralogique, la structure et la courbe granulométrique traduisent un des états d'équilibre correspondant aux équations (5). Cet état instantané a pu être modifié par les phénomènes postérieurs au dépôt.

Si nous passons à l'échelle du strate, on est amené à définir ce qu'on peut appeler le type *physionomique* du *sédiment* qui correspond à l'ensemble des caractères externes macroscopiques visibles (par exemple un strate de calcaire) et aux modes d'alternance des strates. Nous appellerons *association* une alternance de strates de types physionomiques distincts, par exemple, l'alternance de grès et d'argile peut donner l'association « flysch ». Si les strates sont d'origine distincte, par exemple d'origine détritique et d'origine biologique, l'alternance constituera un *groupement bio-détritique*. Alternance et groupements peuvent être à variation continue, périodique, aléatoire, etc.

Nous appellerons en utilisant une terminologie créée par M. Chaput¹ pour les terrasses, *série monogénique*, toute association de strates correspondant à un *cycle morphologique*. Elle pourrait aussi être nommée *monocyclique*. Elle représente une sédimentation oscillatoire ou non amenant le passage d'un état d'équilibre (1) caractérisé par des facteurs I_1 et E_1 à l'état d'équilibre suivant (2) correspondant à des facteurs I_2 et E_2 . Les séries monogéniques peuvent présenter, à leur intérieur, une périodicité plus ou moins régulière de strate ou de feuillets tendant vers un amortissement (période interne). Elles sont séparées des séries voisines par un intervalle de temps beaucoup plus grand que leur période interne. Ainsi pour le banc de l'embouchure de l'Adour (p. 381), *sa durée de formation est de trois marées*. Chaque *strate* représente une *demi-marée* et le banc *monogène peut rester plusieurs mois, plusieurs années ou plusieurs siècles* dans sa phase d'équilibre sans être remplacé ou recouvert par la série monogénique suivante.

Aux échelons supérieurs, les faciès locaux ou globaux peuvent être aussi définis physionomiquement. Par exemple un faciès d'un *seul* type physionomique sera alors qualifié d'*hyperhomogène*. C'est le cas pour la formation marine côtière des Landes entre Arcachon et Soulac qui se définit par un faciès global présentant les caractères statistiques suivants au point de vue granulométrique. Diamètre moyen (525μ), écart quadratique moyen (0,33), écarts extrêmes (250μ à 3 cm) coefficient de sphéricité moyen des grains, 0,8, proportion moyenne de grains de quartz 94 %, stratification (épaisseur du strate superficiel visible, macroscopiquement) = 25 cm — pendage moyen (3° W).

Ce faciès global *hyperhomogène* offre des courbes statistiques

1. CHAPUT. Recherches sur l'évolution des Terrasses de l'Aquitaine. *Bull. Soc. Hist. nat.*, Toulouse, 56, 1927.

avec un maximum très aigu et un faible écart. Il est aussi *hyper-détritique* et *oligobiologique*.

On peut caractériser les faciès pétrographiques locaux et globaux avec encore plus de précision en employant les techniques des phytosociologues et définir ainsi la présence, l'abondance, la surface, le volume occupé, la densité, la fréquence, la constance, la fidélité des associations pétrographiques. Mais la technique des carrés des phytosociologues n'est simple que dans le cas de faciès homogène. Pour un faciès polymorphe, elle exige un travail considérable, car les carrés doivent être serrés. La chose vaut néanmoins la peine d'être tentée.

Il n'est pas possible de séparer l'étude des formations pétrographiques de leurs antécédents et de leur évolution, c'est le point de vue *génétique* de la pétrographie.

Nous distinguerons par exemple au point de vue génétique et physionomique, les *faciès mimétiques* qui doivent la presque totalité de leurs caractères macroscopiques à l'aspect physionomique des roches ayant fourni les produits détritiques et les *faciès de néogenèse* où les éléments ont pris un aspect nouveau. Par exemple, une vase d'estuaire, un faciès corallien sont des faciès de néogenèse. En Algérie, nous avons signalé, au voisinage des massifs primaires, l'existence de faciès mimétiques, d'âge secondaire et tertiaire, ayant l'aspect des schistes micacés primaires ou des argiles rouges triasiques qui en ont fourni les éléments.

V. ÉTAT FINAL ET PROBABILITÉ.

C'est une observation courante de constater que parmi les nombreux résultats possibles pouvant être obtenus au cours d'une évolution géologique, il en est seulement un petit nombre de réalisés. Ce sont de telles observations que l'on a baptisées parfois du nom de « loi géologique ».

Les éléments qui interviennent dans un cycle géologique de longue durée (par exemple une série de remblaiement après une transgression) correspondent à un grand nombre de paramètres indépendants. Or un même état final peut être réalisé par des combinaisons très variées de ces paramètres élémentaires. Cela est dû à l'intervention dans tous les cas d'un facteur constant qui est la *pesanteur*.

Dès qu'un fragment de roche est entraîné par l'érosion vers un point situé plus bas, son déplacement vers le bas représente une perte de son potentiel gravifique dans le système terrestre. *Le*

nivellement orographique devient ainsi tout à fait comparable au nivellement thermique étudié par le thermodynamique. En effet, parmi toutes les trajectoires que peut prendre un grain sous l'action des agents externes, *la plus probable* est celle qui amènera la plus rapide diminution de son potentiel gravifique. Mais, à l'action du champ de force de la pesanteur qui dirige ainsi le phénomène dans un sens déterminé, s'ajoutent à l'échelon individuel, des phénomènes aléatoires.

Ainsi tous les grains d'un banc horizontal qui ont sensiblement le même potentiel gravifique, n'auront pas tous la trajectoire la plus probable, mais présenteront une dispersion obéissant à une loi des écarts plus ou moins complexe. Ce problème des écarts peut être ainsi posé : soit une droite horizontale AB de longueur l supportant n grains de sable répartis au hasard. Quelle est la probabilité P_q pour que q d'entre eux soient situés sur un petit segment de longueur a . Cette probabilité est pour n très grand :

$$P_q = e^{-r} \frac{r^q}{q!} \quad (6)$$

r étant le nombre de grains existant sur le segment a si les n grains étaient répartis uniformément sur AB ou $r = n \frac{a}{l}$

Elle résulte de la loi normale des écarts de Gauss-Laplace. Il est intéressant de noter que l'étude de la grosseur y des galets observés par Krumbein¹, dans un cône de déjection, donne une répartition suivant une loi exponentielle vérifiant une conception probabiliste analogue

$$y = y_0 e^{-ax} \quad (7)$$

Les répartitions probabilistes sont plus ou moins étalées sous l'influence du champ de pesanteur terrestre ; mais il peut de même y avoir des répartitions aléatoires sous l'influence de champs de force sensiblement horizontaux, comme c'est le cas pour l'action des vagues ou des courants amenant le déplacement d'un banc de galets sur une plage de sable. J'ai pu ainsi vérifier qu'un tel banc de galets en déplacement, se répartissait parallèlement au rivage suivant une courbe de probabilité du type de Pearson dissymétrique. Il reste derrière le banc en migration quelques rares galets isolés de l'ordre de 3 galets par 100 m² qui représentent un « résidu de probabilité ».

1. J. KRUMBEIN. *The Journal of Geology*, août-sept. 1937, vol. XLV, n° 6, p. 577-601.

Dans chacun de ces cas, le *phénomène dirigeant* est identique ou comparable à un champ de force et la *dispersion* est due aux *actions aléatoires* d'un ordre temporo-spatial inférieur à celui du champ de force dirigeant.

VI. UTILISATION DES MÉTHODES STATISTIQUES.

Au début de cette note, nous avons vu comment le cas simple du charriage des sables permettait de passer par l'analyse mathématique, d'un phénomène individuel plus ou moins aléatoire à un phénomène statistique global. Comme la plupart des cas naturels sont très compliqués, il n'est pas possible d'établir pour ceux-ci le mode de probabilité et par suite de calculer les équations de passage. On doit alors procéder d'une façon différente.

Au cours d'observations directes dans la nature, on effectue un grand nombre de mesures quantitatives et on établit, à partir de ces mesures, des courbes de fréquence que l'on va interpréter par les méthodes statistiques. On peut successivement analyser les séries statistiques fournies par l'observation, pour un caractère déterminé, puis établir les corrélations entre ces caractères.

1° Séries statistiques. Courbes granulométriques.

Les courbes granulométriques des sédiments représentent dans beaucoup de cas, des courbes de probabilités simples (1) pouvant être reliées aux courbes de Gauss (2). On peut ainsi utiliser les méthodes de Pearson qui permettent d'analyser ces courbes en les ajustant à un des 7 types de Pearson.

Cet ajustement des courbes granulométriques nécessite pour être interprété d'une façon concrète que l'on fasse intervenir la notion de *population homogène*.

Nous appellerons, par comparaison avec les études démographiques et biologiques, « population homogène de grains » un ensemble de grains de même origine ayant subi les mêmes influences aléatoires et répétées d'ordre dynamique ou chimique. Une population ainsi définie présente une répartition normale suivant les lois du hasard et on obtient des courbes simples du type de Gauss ou du type 1 de Pearson. Dans un tel cas, la fréquence des grains tend, conformément à la loi de Bernoulli, vers un chiffre voisin de sa probabilité élémentaire. Si l'origine

1. L. GLANGEAUD. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (5), t. VIII, 1938, p. 625.

19 janvier 1942.

Bull. Soc. Géol. Fr. (5), XI. — 25

des grains est différente ou s'ils n'ont pas les mêmes caractères physiques (densité, forme, etc.), la courbe peut être ramenée à un mélange de deux ou plusieurs populations homogènes.

Un cas fréquent est celui où il se produit un *mélange* de sédiments transportés les uns par *turbulence* et les autres par *roulement* sur le fond. On obtient, en faisant varier les proportions réciproques de chacune des parties, une *famille de courbes du mélange* (roulement-suspension). C'est ainsi que le mélange mécanique de sables amenés par roulement avec des vases fines amenées par turbulence donnent une série plus ou moins continue de sables vaseux, de vase sableuse et de vase. De nombreux autres cas peuvent se présenter. Par exemple, les variations de vitesse des courants fluviaux ou de la vitesse du vent donnent des *familles de courbes de roulement pur*.

Il est possible de mettre en évidence de telles populations homogènes en établissant comme Krumbein¹ les courbes granulométriques cumulatives sur des diagrammes de probabilité $y = \theta(x)$. Une courbe cumulative du type de Gauss se présente, dans un tel cas, comme une droite. Nous avons appliqué cette méthode à un grand nombre de sédiments côtiers et d'estuaires et nous avons constaté que la courbe avec ordonnées logarithmiques offrait souvent au-dessus de 60 μ une partie droite, obéissant donc à une loi de probabilité. Au-dessous de 60 μ , la courbe n'est plus une droite.

Ceci peut être interprété de la façon suivante : les sables au-dessus de 60 μ se déplacent par roulement. Dans un tel cas, ainsi que le montre l'expérience d'Einstein, on peut faire intervenir le calcul des probabilités pour le triage des grains. Il est donc normal que la courbe au-dessus de 60 μ puisse être ramenée à un type de courbe normal de probabilité. Par contre, *au-dessous* de 60 μ , les sédiments sont transportés surtout par turbulence², phénomène beaucoup plus complexe que le roulement. Il intervient en outre dans leur sédimentation des phénomènes chimiques et physiques et notamment des floculations et des attractions interfaciales. La probabilité n'est plus alors aussi simple que dans le cas précédent.

Cet exemple montre les possibilités que donne l'analyse statistique dans l'étude d'un phénomène naturel.

1. J. KRUMBEIN. *J. Sed. Petrology*, vol. 8, n° 3, 1938, p. 84-90.

2. L. GLANGEAUD. *CR. Ac. Sc.*, 208, 1939, p. 1595.

2° Corrélation statistique.

On peut, pour définir quels sont les facteurs dominants, dirigeants et secondaires dans chaque classe, système et objet, étudier statistiquement les variations de chacun de ces facteurs par rapport à un ou plusieurs autres. Dans un pareil cas, on pourra définir la corrélation entre deux séries de statistiques par le coefficient simple ou multiple de *corrélation*.

Nous prendrons deux exemples de corrélations simples et multiples :

1° Relation entre la quantité de *carbone et d'azote* dans les dépôts des estuaires. La fluctuation moyenne du rapport C/Az est relativement peu importante et la dispersion surtout pour les petites quantités de matières organiques est assez faible. Ceci se traduit par un coefficient de corrélation élevé (coefficient calculé (0,85)).

2° *Vases d'estuaires. Phénomènes dynamiques et physico-chimiques*. Il était classique d'admettre que la quantité de vase importante observée dans les estuaires était due à l'action de la floculation de l'eau de mer sur les colloïdes apportés par les rivières.

Nous avons indiqué en 1938¹ que la floculation par l'eau de mer ne jouait pas le rôle dominant dans l'estuaire. C'étaient surtout les facteurs hydrodynamiques qu'il fallait faire intervenir pour expliquer la concentration des vases en suspension dans ce que j'ai nommé le *bouchon vaseux*.

En signalant à juste raison la présence de floculats et agrégats dans l'eau douce même de la Seine, avant son arrivée dans l'estuaire, phénomène que j'ai moi-même observé dans la Gironde et la Loire, MM. Bourcart² et Rajčević³ insistèrent sur le rôle du colmatage entre deux marées pour expliquer le dépôt des vases des estuaires.

Le colmatage intervient seulement dans la sédimentation locale des bords (slikke). Le *phénomène dominant* (bouchon vaseux) est dû à la turbulence particulièrement importante du flot⁴ qui refoule grâce à cela une grande partie des matières entraînées en suspension par le jusant. Ce phénomène dynamique

1. L. GLANGEAUD. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (5), t. VIII, 1938, p. 614 et 619.

2. J. BOURCART. *CR. Ac. Sc.*, 208, 1939, p. 758 et *C. R. Soc. Géol. Fr.*, n° 6, 1939, p. 73.

3. RAJČEVIC. *CR. Ac. Sc.*, 208, 1939, p. 760.

4. L. GLANGEAUD et M^{me} BONICHON. *CR. Ac. Sc.*, 208, 1939, p. 1072. — L. GLANGEAUD. Congrès international de l'Union géodésique et géophysique. Washington, 1939, 12 p., 6 fig.

provoque le stockage des troubles dans les estuaires. L'eau, dans la région du bouchon vaseux, étant ainsi *très chargée en éléments vaseux*, la formation des dépôts vaseux sur les berges et dans les chenaux se fera, ici, plus facilement que dans les autres régions du fleuve. Le *phénomène dirigeant* est donc le phénomène de décalage entre les ondes de troubles et les ondes de marées. Pour le faire apparaître, nous avons établi des diagrammes dans lesquels les abscisses correspondent à la distance à l'embouchure et les ordonnées représentent le pH, la salinité, la vitesse, le pourcentage de floculats existants et la proportion de dépôts vaseux.

Le coefficient de corrélation pour la salinité, le pH et la matière organique montre qu'il n'existe aucune liaison causale et de très faibles liaisons stochastiques entre ces facteurs et le dépôts de vases. Par contre le débit solide est en corrélation certaine avec la turbulence du flot.

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

RAPPORT DE LA COMMISSION DE COMPTABILITÉ

EXAMEN DES COMPTES DE 1941.

A. — BUDGET DE LA SOCIÉTÉ

Le maintien des difficultés générales a entraîné, pour la vie de la Société, une réduction notable des recettes, par disparition d'une grande partie des contributions d'auteurs, qui n'a pas pu être compensée par une compression égale des dépenses. En conséquence, un solde débiteur, sensiblement plus important que celui de l'année dernière, se trouve mis en évidence. Il convient, d'ailleurs, de remarquer que si ce solde débiteur n'est pas plus important, la Société en est redevable à la subvention très généreuse du Centre national de la Recherche scientifique qui, encore plus que les années précédentes, est absolument indispensable pour la bonne marche de la Société. Nous remercions tous ceux qui ont bien voulu intervenir pour obtenir le maintien de cette subvention.

En dehors de ce solde débiteur, les finances de la Société continuent à être saines. La prévision pour créances douteuses, qui a été maintenue très élevée, permettra de faire face aux défaillances possibles dans le recouvrement des créances.

Recettes. — Non compris les contributions d'auteurs (7.800 fr.), les recettes ont été de 171.657 fr. 34, très sensiblement égales à celles de l'année dernière (170.773 fr. 12). Ainsi qu'il a été dit précédemment, la diminution des recettes globales n'est due qu'à la faible participation des auteurs aux impressions.

Comme à l'ordinaire, les cotisations sont comptées égales au nombre de membres, avec une prévision pour créances douteuses destinée à faire face aux circonstances exceptionnelles.

Dépenses. — Déduction faite des contributions d'auteurs, les dépenses s'élèvent à 180.190 fr. 15, contre 171.988 fr. 21 l'année dernière.

Cette augmentation des dépenses porte principalement sur le chapitre publications. En déduisant les contributions d'auteurs, les publications se sont élevées, en 1941 à 74.294 fr. 30, contre, en 1940, 63.843 fr. 85.

Au total, l'exercice se termine par un solde débiteur de 8.532 fr. 81, qui est comblé à la situation par un règlement favorable des comptes des exercices antérieurs.

Projet de budget 1942. — Compte tenu des renseignements que l'on peut posséder à l'heure actuelle et des prévisions que l'on peut faire raisonnablement sur les recettes et les dépenses, le projet de budget de 1942, même en tenant compte d'une subvention égale à celle de l'année dernière, se terminerait par un solde débiteur de 25.500 fr. Il paraît difficile à la Commission de comptabilité de proposer d'autres solutions que de faire supporter ce déficit par les finances générales de la Société, étant entendu, néanmoins, que dès que la situation le permettra, une solution plus normale devra être recherchée.

B. — COMPTE BIBLIOGRAPHIE

Contrairement à ce qui s'était passé l'année dernière, la situation se termine par une légère augmentation du déficit de 1.263 fr. 70 due à un règlement défavorable des comptes antérieurs.

C. — COMPTE PRIX

Le compte de gestion, qui a été déficitaire l'année dernière, fait encore ressortir un léger déficit cette année et il est souhaitable que dans les années prochaines ce déficit disparaisse.

CONCLUSIONS

La Commission insiste à nouveau auprès des Autorités compétentes et des Amis de la Société pour que la subvention du Centre national de la Recherche scientifique soit maintenue. Si cette subvention n'était pas acquise, il deviendrait impossible de maintenir la Société en activité.

L'examen de la comptabilité a permis à la Commission de reconnaître qu'elle était régulière et toutes explications demandées ont été fournies. La Commission propose donc d'approuver les comptes qui sont présentés et qui sont conformes aux livres.

Elle vous propose de donner *quitus* à notre Trésorier sortant M. F. Blondel, en le remerciant du dévouement inlassable et de la compétence avec lesquels il a rempli ses fonctions, en des temps si délicats ; il mérite largement notre reconnaissance.

Elle vous demande aussi d'exprimer à nouveau notre gratitude à la gérante de la Société, M^{me} Mémin, dont la tâche devient chaque jour plus difficile en raison de la situation actuelle.

COMPTE GÉNÉRAL SOCIÉTÉ

Opérations 1941.

Recettes		Dépenses	
Revenus titres.....	16.327,34	Publications :	
Cotisations.....	71.000 —	C. R. somm.....	15.958,75
Ventes et abonn ^{ts} :		Bulletins.....	41.249,10
Bulletins : abonn ^{ts} ..	7.220 —	Mémoires.....	24.946,45
ventes.....	3.953,10	Réun. extr.....	
Mém. : Souscript... ventes... ..	9.300 — 13.567 —	Réimpression.....	
Ventes diverses.....	6.254,50	Loyer, chauff., éclair..	20.171,15
Subvention.....	40.000 —	Impôts, assurances...	4.938,60
Recettes diverses....	1.446,20	Ports divers.....	2.981,85
Compte d'ordre.....	2.587,20	Bibliothèque, fiches, reliures.....	1.468,25
Contrib. auteurs :		Secrétariat, frais de bureau, téléphone..	35.866,20
Bulletins.....	3.800	Remises sur ventes...	3.344
Mémoires.....	4.000	Achats à Bibliogr....	4.000 —
	179.457,34	Dépenses diverses....	963,60
		Compte d'ordre.....	2.587,20
Solde débit. exercice	8.957,81	Créances douteuses...	30.000
	188.415,15		188.415,15

Situation fin 1941.

Crédit		Débit	
Solde créd. exercice..		Solde débit. exercice..	8.957,81
Cotisations à vie.....	6.500	Dépenses exception. :	—
Recettes exception. :		Règlm. comptes clos.	—
Règlm. comptes clos.	9.186,55	Compte d'ordre :	—
Plus-value val. rem- boursées.....	—		8.957,81
Compte d'ordre.....	—	Aug. actif dispon.....	6.728,74
	15.686,55		15.686,55

PROJET DE BUDGET 1942

Opérations 1942.

Recettes		Dépenses	
Revenus titres.....	16.000 —	Publications :	
Cotisations.....	70.000 —	C. R. somm.....	18.000 —
Ventes et abonn ^{ts} :		Bulletins.....	42.000 —
Bulletin : Abonn ^{ts} ..	8.000 —	Mémoires.....	38.000 —
Ventes... ..	6.000 —	Loyer, chauffage, éclai- rage.....	22.000 —
Mém. : Souscript... Ventes.....	5.000 — 12.000 —	Impôts, assurances...	5.500 —
Subventions.....	40.000 —	Ports divers.....	4.000 —
Recettes diverses.....	2.000 —	Biblioth., fiches, reliure	3.000 —
	159.000 —	Secrétariat, frais de bu- reau, téléphone...	38.000 —
Contributions auteurs.	18.000 —	Achats à Bibliogr....	4.000 —
	177.000 —	Dépenses diverses....	3.000 —
Solde débiteur.....	25.500 —	Créances douteuses...	25.000 —
	202.500 —		202.500 —

COMPTE BIBLIOGRAPHIE**Opérations 1941.**

Recettes		Dépenses	
Subventions.....	18.880, —	Secrétariat 1941.....	12.000, —
Souscriptions.....	1.720, —	Impression, t. XII.....	10.000, —
Ventes.....	340, —	Cotisations Fédération..	200, —
Achats par Soc. Géol.	4.000, —	Remises sur ventes...	34, —
			<u>22.234, —</u>
		Solde crédit. exercice.	2.706, —
	<u>24.940, —</u>		<u>24.940, —</u>

Situation fin 1940.

Crédit		Débit	
Solde crédit. exercice.	2.706, —	Comptes clos.....	3.969, 70
Augmentat. du déficit.	1.263, 70		<u>3.969, 70</u>
	<u>3.969, 70</u>		

COMPTE PRIX**COMPTES AFFECTÉS****Opérations 1941.**

Recettes		Dépenses	
Revenus.....	5.886, 30	Prix et Médaille (Viquessel).....	—
Solde débiteur.....	113, 70	Fondation.....	6.000, —
	<u>6.000, —</u>		<u>6.000, —</u>

COMPTE DE GESTION**Opérations 1940.**

Recettes		Dépenses	
Revenus.....	198, 50	Circulaires, affranchis.	—
Solde débiteur. exercice.	61, 48	Frais de banque.....	139, 98
	<u>259, 98</u>	Contrib. Soc. géolog..	120, —
			<u>259, 98</u>

TABLE

DES NOTES ET DES MÉMOIRES CONTENUS

DANS LE VOLUME XI DU BULLETIN (1941)

	Pages
<i>Gilbert Mathieu.</i> — Sur la faune ordovicienne de Réaumur (Vendée) et les conséquences géologiques qui en découlent (<i>Pl. I, 5 fig.</i>).....	3
<i>J. Cuvillier.</i> — L'Éocène de la région de Suez et ses rapports avec le Crétacé supérieur.....	21
<i>Louis Guillaume.</i> — Contribution à la stratigraphie et à la tectonique du Lias dans la région de Thionville. Le « Fossé de Thionville » (<i>Pl. II, 3 fig.</i>).....	35
<i>A. F. de Lapparent.</i> — Les phases de plissements tertiaires dans la région du Mont Ventoux et de la Montagne de Lure (<i>4 fig.</i>).....	75
<i>Geneviève Delpéy.</i> — Mode particulier de nutrition de certains Échinodermes : l'ouverture interne de la bouche (<i>3 fig.</i>).....	87
<i>Pierre Lamare.</i> — Remarques sur la structure du Pays basque (<i>2 cartes</i>).....	97
<i>Louis Guillaume.</i> — <i>Posidonomya mosellana</i> , espèce nouvelle du Sinémurien de Lorraine (<i>Pl. III</i>).....	113
<i>Jacques Bourcart.</i> — Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles (<i>11 fig.</i>).....	117
<i>Maurice Gignoux.</i> — PAUL LEMOINE, 1878-1940 (1 portrait).....	155
<i>René Perrin et Marcel Roubault.</i> — Observation d'un « front » de métamorphisme régional (<i>Pl. IV et V, 5 fig.</i>).....	183
<i>Antonin Lanquine et Jean Cuvillier.</i> — Sur les faciès siliceux du Sparnacien dans l'Est et le Sud-Est du Bassin de Paris (<i>3 fig.</i>).....	195
<i>Geneviève Delpéy.</i> — Organes spéciaux d'Échinodermes primitifs : les peccinirhombes (<i>5 fig.</i>).....	207
<i>Fernand Daguin.</i> — Observations relatives aux Grès de Mugron (Landes).....	219
<i>Pierre A. Gillard.</i> — Sur la présence du genre <i>Monoceratopora</i> LANG dans l'Angoumien supérieur de la Charente-Maritime (<i>2 fig.</i>).....	223
<i>A. Bigot.</i> — Jurassique inférieur de la Sarthe et du Maine-et-Loire.....	227
<i>Jean Lacoste.</i> — La virgation sud-rifaine. Recherches sur la marge sud du sillon rifain (secteur Haut-Ouergha-Haut-Leben) (<i>2 fig.</i>).....	241
<i>Alfred Bastin et André Cailleux.</i> — Action du vent et du gel au Quaternaire dans la région bordelaise (<i>Pl. VI, 5 fig.</i>).....	259
<i>H. Schøeller.</i> — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses (<i>7 fig.</i>).....	267

<i>Marian Ksiazkiewicz.</i> — Observations géologiques dans le Mozambique méridional.....	291
<i>Étienne Patte.</i> — Éocène et Quaternaire soliflués de Pontpoint (Oise). Remarques générales sur la solifluction (16 fig.).....	295
<i>B. Brajnikov.</i> — Contributions à l'étude des limons (6 fig.).....	323
<i>H. Alimen.</i> — Observations au sujet des limites et de la subdivision du Stampien à propos d'une note de G. Denizot.....	339
<i>Colette Dechaseaux.</i> — L'inversion chez les Lamellibranches (4 fig.).....	343
<i>H. Derville.</i> — De quelques manières d'être des Calcisphères (Pl. VII)....	357
<i>Louis Dangeard.</i> — Observations géologiques sur les environs de Bayeux (1 fig.).....	367
<i>Louis Glangeaud.</i> — Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments.....	371
<i>Rapport de la Commission de Comptabilité.</i>	389
<i>Table du tome XI.</i>	393

Errata.

Bull. Soc. Géol. Fr., t. XI, fasc. 4-5-6. Note de M. J. Bourcart.

P. 117 : la référence bibliographique de la note (3) se rapporte à la note (2).

P. 119, 11^e ligne à partir du bas, au lieu de 1 μ . lire 8 μ .

P. 146, note (3) $\mathcal{R} = \frac{v \cdot m}{v}$

v étant la viscosité cinématique.

DATES DE PUBLICATION

DES FASCICULES QUI COMPOSENT CE VOLUME :

Fascicules 1-2-3 (Feuilles	1-7, pl. I-II)	mai 1942.
— 4-5-6 (—	8-15, pl. III-V, 1 portrait)	octobre 1942.
— 7-8-9 (—	16-25, pl. VI-VII)	décembre 1942.

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES ET DES AUTEURS

du Bulletin et du Compte Rendu sommaire
des Séances de la Société Géologique de France

5^e série, tome XI, année 1941

Les renvois aux pages du Bulletin sont en chiffres gras, les chiffres ordinaires maigres se rapportent aux pages du Compte rendu sommaire.

A

- ABRARD (René). Nummulites draguées au Sud de Pont-Aven (Finistère), 20. — Prés. d'ouvr., 56. — Les citations d'espèces oligocènes dans les marnes d'entre troisième et deuxième masses du gypse, 117.
- Afrique. Voir Maroc, Mozambique.
- ALIMEN (Henriette). Prés. d'ouvr., 127, 128. — Observations au sujet des limites et de la subdivision du Stampien à propos d'une note de G. Denizot, 131, **339**.
- Allocution. L. MORELLET, 3, 57.
- ANTHOINE (R). Prés. d'ouvr., 42.
- Aquitaine. H. SCHÖLLER, 32.
- Argiles smectiques. P. URBAIN, 17.
- ASTRE (Gaston). Lame calcaire entre les pics Crabioules et Lézat, 92. — Ankérite des Arguts, 121.
- AUBERT (G.). Prés. d'ouvr., 115.
- naire dans la région bordelaise, 89, 259 (pl. VI, 5 fig.).
- BELLAIR (Pierre). Prés. d'ouvr., 114.
- BIGOT (A.). Prés. d'ouvr., 26. — Jurassique inférieur de la Sarthe et du Maine-et-Loire, 106, **227**.
- BLANCHET (F.). Prés. d'ouvr., 46.
- BLONDEL (F.). Prés. d'ouvr., 97.
- BONICHON (P.). Prés. d'ouvr., 138.
- BONNET (Pierre). Relations entre le Jurassique et le Crétacé dans le Sud-Est du Bassin de Paris, 73.
- BOURCARTE (Jacques). Présent. d'ouvr., 10, 47, 99, 127. — Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles, 43, **117** (11 fig.).
- BOURCARTE (J.), FLORENTIN (J.), ROMANOVSKY (V.). Prés. d'ouvr., 99.
- BOURCARTE (J.). et P. PÉREAU. Prés. d'ouvr., 99.
- BOURDEAU (Jean-Marie). Sur l'âge du calcaire lacustre de La Mothe-Saint-Héray (Deux-Sèvres), 80. — Nécrologie, 106.
- BOURDEAU (Jean-Marie) et André GUILLER. Observations sur l'Éocène continental de la banlieue nantaise, 68.
- BRAJNİKOV (B.). Prés. d'ouvr., 99. — Contribution à l'étude des limons, 121, **323** (6 fig.).
- BREISTROFFER (Maurice). Prés. d'ouvr., 46. — Sur la présence d'Aucellines dans l'Albien inférieur de la Nerthe (Bouches-du-Rhône), 91.
- BROSSARD (B.). Prés. d'ouvr., 26.
- BRUN (Pierre de). Prés. d'ouvr., 86. — Nécrologie, 89.
- Bryozoaires. P. A. GILLARD, 51, **223**.

B

- BABET (Victor). Nécrologie, 89.
- BARRABÉ (L.). Sur un style tectonique des Corbières orientales, 120.
- Bassin de Paris. P. JODOT, 34. — L. et J. MORELLET, 37, 95. — P. BONNET, 73. — L. FEUGUEUR, 94. — P. JODOT, 111. — R. ABRARD, 117. — Fr. DOUVILLÉ, 129. — A. LANQUINE et J. CUVILLIER, 195. — E. PATTE, **293**. — H. ALIMEN, **339**.
- BASTIN (Alfred) et André CAILLEUX. Actions du vent et du gel au Quater-

C

- CAILLEUX (André). Prés. d'ouvr., 56. — Les actions éoliennes périglaciaires en Europe, 82.
- CAILLEUX (Alfred BASTIN et André —). Actions du vent et du gel au Quaternaire dans la région bordelaise, 89, 259 (pl. VI, 5 fig.).
- Calcsphères. H. DERVILLE, 357.
- Cameroun occidental. B. GÈZE, 23.
- CARPENTIER (A.). La flore des grès de l'Hermenault (Vendée), 66.
- Castillon (Massif de) [Ariège]. E. RAQUIN, 8.
- CATZIGRAS (France). Prés. d'ouvr., 86.
- CAYEUX (L.). Prés. d'ouvr., 45, 98.
- Céphalopodes. L. et J. MORELLET, 37.
- CHAPUIS (Albert). Nécrologie, 116.
- CHAUVEL (Jean). Prés. d'ouvr., 113.
- CHAVAN (A.). Sur la position systématique du genre *Eriphyla* GABB, 108. — Prés. d'ouvr., 114.
- CORROY (Georges). Prés. d'ouvr., 86.
- CUVILLIER (J.). L'Éocène de la région de Suez et ses rapports avec le Crétacé supérieur, 5, 21.
- CUVILLIER (Antonin LANQUINE et Jean —). Sur le faciès siliceux du Sparnacien dans l'Est et le Sud-Est du Bassin de Paris, 75, 195 (3 fig.).

D

- DAGUIN (Fernand). Observations relatives au grès de Mugron (Landes), 91, 219. — Sur des restes de Céphalopodes déroulés de grande taille dans le Crétacé supérieur des Pyrénées occidentales, 132. — Prés. d'ouvr., 138.
- DANGEARD (Louis). Observations géologiques sur les environs de Bayeux, 131, 367 (1 fig.).
- DECHASEAUX (Colette). Localisations de la faune dans le récif de Valfin (note préliminaire), 13. — Prés. d'ouvr., 55. — L'inversion chez les Lamellibranches, 131, 343 (4 fig.).
- DELPEY (Geneviève). Mode particulier de nutrition de certains Échinodermes : l'ouverture interne de la bouche, 37, 87 (3 fig.). — Organes spéciaux d'Échinodermes primitifs : les pectinirhombes, 82, 207 (5 fig.). — Prés. d'ouvr., 127.
- DEMAX (A.). Prés. d'ouvr., 46.
- DÉRIBÉRE (M.). Prés. d'ouvr., 27, 114.

- Sur la diffusion du strontium dans le Lias du Poitou, 67.
- DERVILLE (H.). De quelques manières d'être des Calcsphères, 131, 357 (pl. VII).
- Deux-Sèvres. P. A. GILLARD, 40, 133. — J.-M. BOURDEAU, 80.
- DOUVILLÉ (François). Contribution à l'étude des faunes du Cornbrash. Révision des genres *Clydoniceras* et *Macrocephalites*, 64. — Jurassique à l'Ouest du Bassin de Paris. Première note préliminaire, 129.
- DRESCH (J.). Prés. d'ouvr., 137.
- DUBAR (Gonzague). Prés. d'ouvr., 42.
- DUPUIS (R.). Prés. d'ouvr., 114.
- DUPONT (G.). Prés. d'ouvr., 138.
- DURAND (J.-F.). Nécrologie, 27.

E

- Eau de mer. A. RIVIÈRE, 19, 50, 75.
- Échinodermes. G. DELPEY, 87, 207.
- Éocène. J.-M. BOURDEAU et A. GUILCHER, 68. — A. GUILCHER, 77. — L. et J. MORELLET, 84. — P. JODOT, 111. — J. CUVILLIER, 25. — A. LANQUINE et J. CUVILLIER, 195.

F

- FABRE (Suzanne). Prés. d'ouvr., 86.
- FEUGUEUR (L.-L.). Étude préliminaire sur le Bartonien de la vallée de la Viosne (affluent de l'Oise, rive droite), 94.
- FLORENTIN (J.). Prés. d'ouvr., 99.
- Foraminifères. P. MARIE, 29, 38, 53, 70, 82, 135.
- FOURNIER (Eugène). Nécrologie, 116.
- FRANCIS-BOEUF (Claude). Prés. d'ouvr., 10, 46, 99. — Le rapport de l'azote à la matière organique totale dans les vases de l'estuaire de la Penzé (Finistère), 109.
- FROLOW (V.). Prés. d'ouvr., 10.
- FURON (Raymond). Prés. d'ouvr., 85, 98, 99.

G

- GAGNEBIN (E.). Prés. d'ouvr., 126.
- GANDIL (G.). Prés. d'ouvr., 86.
- GARDE (G.). Prés. d'ouvr., 86. — Le compartiment granitique surélevé de Saint-Yvoine (P.-de-D.), 123.
- GARDET (G.). La bordure du premier plateau aux environs de Poligny

(Jura) : témoins de poussées glaciaires et traces de chevauchement, 31.

Géographie physique. A. BASTIN et A. CAILLEUX, 260.

GEZE (Bernard). Note complémentaire sur la chaîne volcanique du Cameroun occidental, 23.

GIGNOUX (M.). Prés. d'ouvr., 46. — Notice nécrologique à la mémoire de Paul LEMOINE, 61, 155 (1 portrait).

GILLARD (Pierre A.). Sur la position stratigraphique du bassin tertiaire lacustre de la Mothe-Saint-Héray, 40. — Sur la présence et la diffusion du baryum et du strontium dans le Lias supérieur du Détroit de Poitiers, 43. — Sur la présence de *Diasporidae* dans l'Aalénien supérieur du Détroit de Poitiers et sur quelques variations zoariales du genre *Stomatopora* BRONN, 51. — Sur la présence du genre *Monoceratopora* LANG dans l'Angoumien supérieur de la Charente-Maritime, 64, 223 (2 fig.). — Prés. d'ouvr., 85. — Sur la position stratigraphique du Bassin tertiaire lacustre de la Mothe-Saint-Héray (2^e note), 133.

GLANGEBAUD (L.). Prés. d'ouvr., 85, 86. — Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments, 371.

GOGUEL (Jean). Prés. d'ouvr., 4, 85, 100. — La chaleur interne du Globe et la radioactivité, 27.

GOUDON (Maurice). Nécrologie, 27.

GOVERNET (Claude). Prés. d'ouvr., 86.

GUILCHER (A.). Sur la présence de Grès quartzites du type Grès à Sabals sur le Plateau du Léon (Finistère), 79.

GUILCHER (Jean-Marie Bourdeau et André —). Observations sur l'Éocène continental de la banlieue nantaise, 68.

GUILLAUME (Louis). Contribution à la stratigraphie et à la tectonique du Lias dans la région de Thionville. Le « Fossé de Thionville », 25, 35 (pl. II, 3 fig.). — Prés. d'ouvr., 26. — *Posidonomya mosellana*, espèce nouvelle du Sinémurien de Lorraine, 37, 113 (pl. III).

H

HÉRENGER (L.). Prés. d'ouvr., 46.

HUBERT (Henri). Nécrologie, 116.
Hydrogéologie. H. SCHÖELLER, 267.

J

JÉRÉMINE (E.). Prés. d'ouvr., 10.

JODOT (Paul). Observations paléontologiques sur le Nummulitique du Roc-de-Chère (Lac d'Annecy), 5. — Quelques renseignements sur les perles fossiles, 11. — Rebroussement de l'Anticlinal de Gamaches dans la Montagne de Reims, 34. — Le Thanétien continental du versant méridional de la Montagne de Reims (Marne), 111. — Prés. d'ouvr., 115.

JOLEAUD (Léonce). Prés. d'ouvr., 127.

JOURDY (Émile). Nécrologie, 23.

Jura. G. GARDET, 31. — G. MATHIEU, 64.

Jurassique. A. BIGOT, 227.

K

KELLER (Alexandre). Nécrologie, 116.

KSIĄŻKIEWICZ (Marian). Observations géologiques dans le Mozambique méridional, 291.

L

LACOSTE (Jean). La virgation sud-rifaine. Recherches sur la marge sud du sillon rifain (secteur Haut-Ouergha-Haut-Leben), 64, 241 (2 fig.).

LAMARE (Pierre). Remarques sur la structure en pays basque, 5, 97 (2 cartes).

Lamellibranches. L. GUILLAUME, 113. — C. DECHASEAUX, 343.

Landes. F. DAGUIN, 219.

LANQUINE (Antonin). Prés. d'ouvr., 36.

LANQUINE (Antonin) et Jean CUVILLIER. Sur les faciès siliceux du Sparnacien dans l'Est et le Sud-Est du Bassin de Paris, 75, 195 (3 fig.).

LANTENOIS (H.). Nécrologie, 4.

LAPPARENT (A. F. DE). Communication sur les Dinosauriens jurassiques de Damparis (Jura), 8. — Les phases de plissements tertiaires dans la région du Mont Ventoux et de la Montagne de Lure, 29, 75 (4 fig.).

LAPPARENT (J. DE). Prés. d'ouvr., 98.

LAVOCAT (R.). Nouvelles observations sur l'ostéologie d'un Rongeur oligocène, *Issidoromys* CROIZET, 89.

LECOINTRE (G.). Prés. d'ouvr., 71.

LEMOINE (Paul). Notice nécrologique,

- par M. GIGNOUX, 61, 155 (1 portrait).
LEMOINE (M^{me} Paul). Prés. d'ouvr., 61, 85.
Lias. P. A. GILLARD, 43. — M. DÉRIHÉRE, 67. — L. GUILLAUME, 35, 113.
— A. BIGOT, 227.
Lithologie. P. URBAIN, 106. — C. FRANCIS-BOEUF, 109. — G. ASTRE, 121. — J. BOURCART, 117. — B. BRAJNIKOV, 323. — L. GLANGEAUD, 371.
LUGEON (Maurice). Prés. d'ouvr., 126.

M

- MAIRE (Victor). *Nécrologie*, 89.
MARIE (Pierre). A propos des Foraminifères du Calcaire à Rudistes des Martigues (Var), 29. — Zones à Foraminifères du Gault dans le département de l'Aube, 38. — Zones à Foraminifères des marnes du Gault de Wissant (Pas-de-Calais), 53. — A propos des Foraminifères pléistocènes de la Côte des Somalis, 70. — Prés. d'ouvr., 72. — Sur la microfaune des argiles albiennes du Pays de Bray, 82. — Zones à Foraminifères du Gault atteintes par forages dans la région parisienne, 135.
Maroc. P. URBAIN, 17. — G. WATERLOT, 63, 77. — J. LACOSTE, 241.
MARTY (Pierre). *Nécrologie*, 11.
Massif Central. G. GARDE, 123.
MATHIEU (G.). Sur la faune ordovicienne de Réaumur (Vendée) et les conséquences géologiques qui en découlent, 4, 3 (pl. I, 5 fig.). — Observations sur les contours précis de la bande des marnes irisées à Menotey et à Montmirey-le-Château (Jura), 64.
MAURIN (Émile). *Nécrologie*, 73.
MAURY (Eugène). *Nécrologie*, 11.
MENGAUD (L.). Prés. d'ouvr., 138.
Métamorphisme. R. PERRIN et M. ROUBAULT, 183.
MONGIN (Denise). Prés. d'ouvr., 86.
Montagne de Lure. A. F. DE LAPPARENT, 75.
MORELLET (L.). *Allocution*, 3, 57.
MORELLET (L. et J.). Découverte d'une perle fossile, 9. — Réponse à la communication de P. Jodot sur les perles fossiles, 22. — Présence du genre *Aturia* dans l'Auvernien du bassin de Paris, 37. — Remarques préliminaires sur les faunes malacologiques de l'Éocène de la Bretagne et du Cotentin, 84. — Observations à propos de la note de G. DENIZOT :

Le Stampien de la région parisienne et le classement de l'Oligocène, 95.
MORET (L.). Prés. d'ouvr., 46.
Mozambique. M. KSIAZKIEWICZ, 294.

N

- Nécrologie*. H. LANTENOIS, 4. — E. MAURY, P. MARTY, 11. — E. JOURDY, 23. — M. GOURDON, J.-F. DURAND, 27. — E. MAURIN, 73. — V. MAIRE, P. DE BRUN, V. BABET, 89. — J.-M. BOURDEAU, 106. — A. CHAPUIS, E. FOURNIER. H. HUBERT, A. KELLER, 116. — G. STHELIN, 129. — P. LEMOINE, 155. — E. ARGAND, A. P. DUTERTRE, E. GIN, J. GUBLER, R. HUMERY, J. LAMBERT, A. LE CONTE, P. LEMOINE, R. MAZÈRES, C. PICQUENARD, G. WACHER, B. YOVANOVITCH, 57, 58, 59.
Normandie. L. DANGEARD, 367.
Nummulites. R. ABRARD, 20.
Nummulitique. P. JODOT, 5. — F. DA GUIN, 219.

O

Ordovicien. G. MATHIEU, 3.

P

- Paléobotanique*. A. CARPENTIER, 66.
Paléontologie. R. LAVOCAT, 89. — M. BREISTROFFER, 91. — A. CHAVAN, 108. — G. RANSON, 123. — F. DAGUIN, 132. — L. GUILLAUME, 113. — P. A. GILLARD, 223.
PATTE (Étienne). Éocène et Quaternaire soliflués de Pontpout (Oise). Remarques générales sur la solifluction, 64, 293 (16 fig.).
Pays basque. P. LAMARE, 97.
PÉREAU (P.). Prés. d'ouvr., 99.
Perles fossiles. L. et J. MORELLET, 9, 22. — P. JODOT, 11.
PERRIN (René) et Marcel ROUBAULT. Observations d'un front de métamorphisme régional, 43, 183 (pl. IV et V, 5 fig.).
Physique du Globe. J. GOGUEL, 27.
Plissements tertiaires. A. F. DE LAPPARENT, 75.
Pont-Aven (Finistère). R. ABRARD, 20.
Posidonomya mosellana. L. GUILLAUME, 113.
Pyrénées. G. ASTRE, 92. — L. BARRABÉ, 120.

Q

Quaternaire. A. BASTIN et A. CAILLEUX, 259.

R

RAGUIN (E.). Sur l'âge des schistes de la bordure nord du massif de Castillon (Ariège), 8.

RAJČEVIĆ (B.). Prés. d'ouvr., 10.

RANSON (Gilbert). Note préliminaire sur *Ostrea Virleti* DESHAYES. *O. excavata* DESHAYES et *O. pseudo-edulis* DESHAYES, 123.

Rapport de la Commission de Comptabilité, 389.

RIVIÈRE (A.). Sur la réserve alcaline et les carbonates de l'eau de mer, 19. — Sur la solubilité du phosphate tricalcique dans l'eau de mer, 50. — Sur la sédimentation phosphatée en milieu marin, 75.

Roc-de-Chère (Lac d'Annecy). P. JODOT, 5.

ROEHICH (Christian). Prés. d'ouvr., 127.

ROMANOVSKY (V.). Prés. d'ouvr., 99.

ROUBAULT (René PERRIN et Marcel—). Observations d'un front de métamorphisme régional, 43, 183 (pl. IV et V, 5 fig.).

ROUYER (Camille). Tectonique de la Basse-Bourgogne entre Tonnerre et Avallon, 124.

S

SCHOELLER (H.). Les conditions de formation des molasses et du Sidérolithique de la bordure NE du Bassin

d'Aquitaine, 32. — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses, 95, 267 (7 fig.).

SEVENSMA (P.-H.). Prés. d'ouvr., 25.

Sidérolithique. H. SCHOELLER, 32.

Solifluction. E. PATTE, 293.

SOYER (R.). Prés. d'ouvr., 56.

Stampien. H. ALIMEN, 339.

STEHLIN (H.-G.). Nécrologie, 129.

Suez. J. CUVILLIER, 25.

T

Tectonique. C. ROUYER, 124. — R. PERRIN et M. ROUBAULT, 183. — J. LACOSTE, 241.

Thionville. L. GUILLAUME, 35.

Trias. G. MATHIEU, 64.

U

URBAIN (Pierre). Sur quelques particularités minéralogiques des argiles smectiques du bassin pliocène de la Moulouya (Maroc), 17. — Sur la perméabilité relative de quelques roches argileuses du Bassin de Paris, 106.

V

Valfin. C. DECHASEAUX, 13.

Vendée. G. MATHIEU, 3.

W

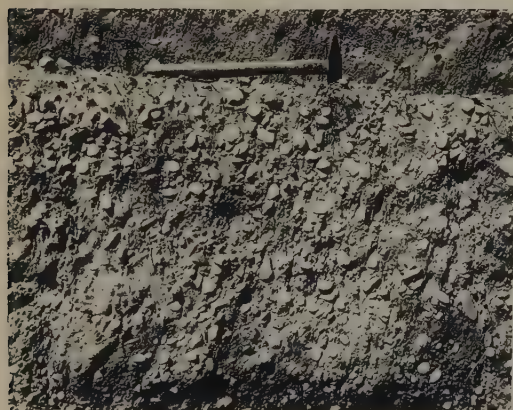
WATERLOT (Gérard). Le Tarannon au Sud du Djebel Bani (Maroc), 63. — Les niveaux stratigraphiques des phtanites à Graptolites du Maroc, 77.



1



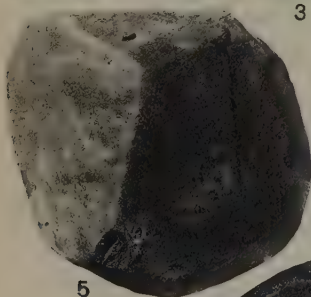
2



3



4



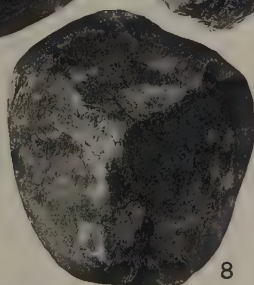
5



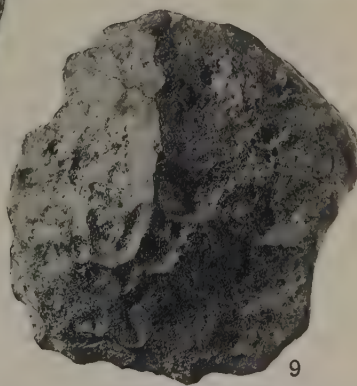
6



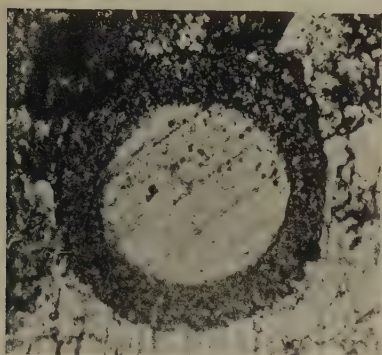
7



8



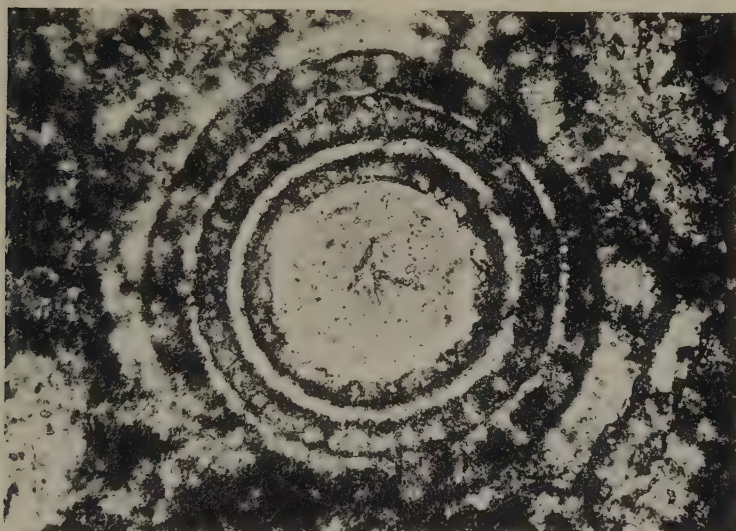
9



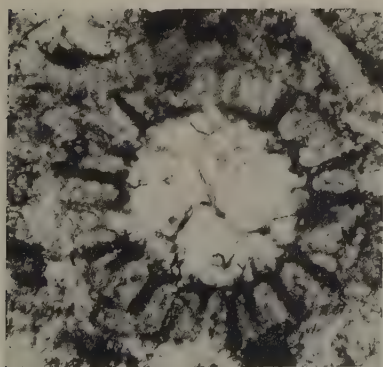
1



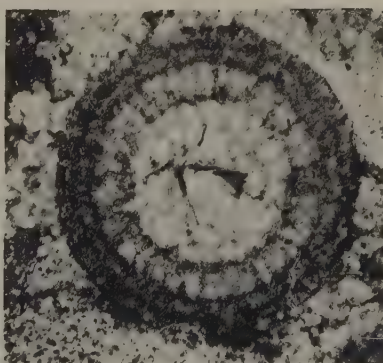
2



5



3



4

MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

(Nouvelle Série)

Tome XVII.

1. — 39. — M^{me} DE CIZANCOURT et L. R. COX, *Contribution à l'étude des faunes tertiaires de l'Afghanistan*, 5 pl., 44 p. fr. 130
- 2-4. — 40. — J. ROGER, *Le genre Chlamys dans les formations néogènes de l'Europe. Conclusions générales sur la répartition géographique et stratigraphique des Pectinidés du Tertiaire récent* (Suite du Mém. de Paléont. N° 26 et du Mém. N. S. N° 10 de DEPÉRET et ROMAN), 28 pl., 294 p. fr. 325

Tome XVIII.

- 1-4. — 41. — G. MAZENOT, *Les Palæhoplittidæ tithoniques et berriasiens du Sud-Est de la France*, 40 pl., 303 p. fr. 360

Tome XIX, 1940.

- 1-2. — 42. — Cst GÉRARD et J. BICHELONNE, *Les Ammonites aaléniennes du Mineraide fer de Lorraine*, 33 pl., 60 p. fr. 200
- 3-4. — 43. — Geneviève DELPEY, *Gastéropodes marins : Paléontologie — Stratigraphie*, 28 pl., 412 p. fr. 140

Tome XX, 1941.

1. — 44. — Colette DECHASEAUX, *Rudistes : I. Dicerias et Heterodicerias*, 4 pl., 55 p. fr. 100
- 2-3. — 45. — Maurice LERICHE, *Contribution à l'étude des faunes ichthyologiques marines des Terrains tertiaires de la Plaine Côtière Atlantique et du Centre des États-Unis. Le synchronisme des formations tertiaires des deux côtés de l'Atlantique*, 8 pl., 112 p. fr. 200

Tome XXI, 1942.

Souscription : France, 200 fr. ; Étranger, 250 fr.

- 1-2. — 46. — André CAILLEUX, *Les actions éoliennes périglaciaires en Europe*, 5 pl., 176 p. fr. 200
3. — 47. — A. F. DE LAPPARENT, *Les Dinosauriens jurassiques de Damparis (Jura)* (sous presse).....
4. — 48. — Fr. DOUVILLÉ, *Contribution à l'étude des faunes du Cornbrash. Révision des genres Clydoniceras et Macrocephalites (en préparation)*,.....

TABLE DES MATIÈRES (TOME XI, FASCICULE 7-8-9)

	Pages
<i>Jean Lacoste.</i> — La virgation sud-rifaine. Recherches sur la marge sud du sillon rifain (secteur Haut-Ouergha-Haut-Leben) (2 fig.).....	241
<i>Alfred Bastin et André Cailleux.</i> — Action du vent et du gel au Quaternaire dans la région bordelaise (Pl. VI, 5 fig.).....	259
<i>H. Schøeller.</i> — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses (7 fig.).....	267
<i>Marian Ksiazkiewicz.</i> — Observations géologiques dans le Mozambique méridional.....	291
<i>Étienne Patte.</i> — Éocène et Quaternaire soliflués de Pontpoint (Oise). Remarques générales sur la solifluction (16 fig.).....	295
<i>B. Brajnikov.</i> — Contribution à l'étude des limons (6 fig.).....	323
<i>H. Alimen.</i> — Observations au sujet des limites et de la subdivision du Stampien à propos d'une note de G. Denizot.....	339
<i>Colette Dechaseaux.</i> — L'inversion chez les Lamellibranches (4 fig.).....	343
<i>H. Derville.</i> — De quelques manières d'être des Calcisphères (Pl. VII)....	357
<i>Louis Dangeard.</i> — Observations géologiques sur les environs de Bayeux (1 fig.).....	367
<i>Louis Glangeaud.</i> — Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments.....	371
<i>Rapport de la Commission de Comptabilité</i>	389
<i>Table du tome XI</i>	393